SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

Les physiciens arrêtent le temps p.30

Climat

Dossier spécial 30 pages

Inverser le réchauffement, c'est possible

p.40

FÉVRIER 2023 - N° 912 ALLEMAGNE 7,40 € / AUTRICHE 6,50 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / DOM 5,90 € / DOM AVION 7,90 € / ANDORRE 5,40 € / PORTUGAL 5,70 € / TOM 850 XPF / ILE MAURICE 8 REU / TOM AVION) 1590 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 85 DH / CANADA-USA 8,25 $

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 912 - FÉVRIER 2023 - SPÉCIAL CLIMAT

L 13418 - 912 - F: 5,30 € - RD

presse citron

Meilleur antivirus

★★★★★

01NET

Suite hyper complète

★★★★

PC EDITORS' CHOICE
PCMAG.COM

Choix de la rédaction

★★★★½

Téléchargez gratuitement sur avast.com/sciences

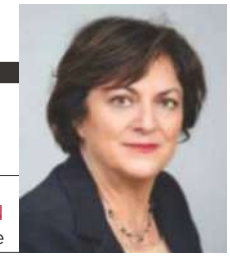
Bien plus qu'un simple antivirus

Avast One regroupe protection, confidentialité et performances.

N'oubliez pas de protéger votre smartphone.
Téléchargez gratuitement Avast One sur mobile

Avast One

© 2022 Copyright Avast Software


BERNARD MARTINEZ

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

À la recherche du clou d'or

Ils sont huit sous l'eau, douce ou salée, du Japon à la péninsule Antarctique, de la Chine à l'Australie, et un neuvième est en montagne, dans les Sudètes (Pologne). Il s'agit des neuf sites en compétition pour le « clou d'or », un fameux marqueur plus connu sous son appellation anglo-saxonne de *Golden Spike*. Ou, moins poétique, celui que les spécialistes de la Commission internationale de stratigraphie nomment « point stratotypique mondial » (PSM). En clair, la strate géologique très précise dans laquelle sera planté —insigne honneur — un marqueur internationalement agréé indiquant le début d'une nouvelle ère.

La marque d'anthropos. En l'occurrence, celle qui agite le petit groupe très spécialisé sur la question n'est pas n'importe laquelle, il s'agit de l'anthropocène. Autrement dit, l'ère où l'humain *(anthropos)* a acquis un tel superpouvoir que toute la planète en ressent l'impact. D'aucuns pensaient que cette affaire de clou d'or serait réglée en fin d'année 2022 par les deux douzaines de votants de l'Anthropocene Working Group, mais ils remettent le couvert pour quelques semaines d'ici au printemps. Car ils ne trouvent pas si aisé de déterminer ce qui doit parfaitement caractériser le démarrage de l'ère en question, enregistré géologiquement.

Multiples bouleversements. Le profane a de quoi être surpris, car le terme d'anthropocène est désormais passé dans le langage courant depuis qu'il a été mis en exergue au XX^{e} siècle par des scientifiques comme le prix Nobel de chimie Paul J. Crutzen, disparu en 2021, ou, en France, par le glaciologue Claude Lorius. On le comprend comme l'époque rendant compte des changements majeurs que l'activité humaine a engendrés. De multiples bouleversements — extraction de sable, des ressources minières ; canalisation des fleuves ; changement climatique dû à l'usage de combustibles fossiles ; pollution par les pesticides et les plastiques…

Boue, coraux et plutonium. Reste à déterminer ce qui sera la clé du clou d'or. Quelles particules repérer, qui demeureront pendant des éons dans la boue d'un lac comme celui de Crawford en Ontario (Canada) ou celui de Searsville en Californie (États-Unis). Ou quels éléments chimiques signaler, piégés dans l'exosquelette de coraux du golfe du Mexique ou du récif de Flinders en Australie… Il n'aura échappé à personne que les retombées des bombes atomiques au plutonium, marqueur d'une production humaine car seulement à l'état de trace naturellement, sont mesurables. Quant aux plastiques, on les retrouve partout, dans les fleuves, l'océan mondial et jusqu'aux Pôles.

Holocène et anthropocène. Le choix du site, en Californie ou en Chine, en Australie ou en Pologne… pourrait finalement revêtir plus d'importance qu'on ne l'imagine. Voire devenir tout un symbole. Car, *in fine*, et c'est ce qui fait encore grincer quelques dents scientifiques, l'annonce avérée des débuts de l'anthropocène sera éminemment politique. En attendant, l'humanité continue de vivre dans l'holocène, 11 700 ans au compteur, clou d'or au Groenland. ■ @dominiqueleglu

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

En quête des origines de la vie
(*Sciences et Avenir-La Recherche* n° 911, janvier 2023)

Je suis troublé par des points de vue d'apparence contradictoire exprimés dans votre dossier au demeurant passionnant. En page 44, Christophe Malaterre rapporte que, lors de ses expériences de 1953, Stanley Miller a *« démontré qu'une grande diversité de molécules organiques comme les acides aminés peuvent se former spontanément : à partir de méthane, d'ammoniac, d'eau et de dihydrogène »*, mélange qu'il supposait être celui des composés inorganiques principaux de l'atmosphère primitive. Or, en page 34, il est dit que ces fameuses expériences seront par la suite contestées. L'atmosphère primitive n'était pas dominée par du méthane mais du dioxyde de carbone.

Jean Belhache

S. et A. : Les conclusions des expériences de Stanley Miller sont en effet contestées : la composition de l'atmosphère primitive qu'il pensait reproduire dans les années 1950 n'était pas la bonne, dominée en réalité par du dioxyde de carbone. Or, les quantités et la variété de molécules organiques fabriquées dans les bonnes conditions deviennent beaucoup plus restreintes. Ces travaux ont joué néanmoins un rôle décisif. Car ils ont montré que quelques molécules inorganiques simplement mélangées, de manière non contrôlée et soumises à une source d'énergie, peuvent engendrer divers composés organiques. Elles donneront naissance, de fait, à un nouveau domaine de recherche : la chimie prébiotique.

Neandertal

Au sujet de votre article « Sapiens-Neandertal, pour quelques neurones de plus » *(S. et A. n° 910, décembre 2022)*, j'aurais deux questions. On sait qu'il y a eu hybridation entre ces deux *Homo* : peut-on le voir parmi les gens qui encore aujourd'hui portent cette variante néandertalienne ? Du moment qu'elle a survécu jusqu'aujourd'hui, serait-on en droit de supposer qu'elle n'a pas constitué de handicap ?

Hugo Perez Bercoff

S. et A. : La variante néandertalienne du gène a bien été identifiée chez 11 hommes en tout, sur une base de données de plus de 76 000 génomes. La fréquence de l'allèle néandertalienne est estimée à 0,2 % dans les populations. Par ailleurs, on ne sait pas combien de neurones en plus produit la variante moderne par rapport à la variante archaïque. Et si le nombre joue un rôle, ce n'est pas le seul facteur impliqué dans la croissance et dans la plasticité du cerveau. Quant aux *Homo sapiens* qui porteraient aujourd'hui la version néandertalienne du gène producteur de cellules spécialisées dans la communication et le traitement d'informations, *« dotés de moins de neurones, ils ont pu développer des mécanismes de compensation »*, soutient Wieland Huttner, l'un des auteurs de l'article controversé. Sans compter que nos contemporains vivent dans des environnements très différents de ceux des humains préhistoriques et que leurs capacités cognitives sont sollicitées et stimulées très différemment aujourd'hui.

Rectificatif

Moustiques. Dans l'article « Certaines peaux sont des aimants à moustiques », les expériences n'ont pas été menées sur le moustique-tigre (*Aedes albopictus*), mais sur *Aedes aegypti* (S. et A. *n° 910, p. 25*).

Panspermie. La durée de vie de la bactérie *Deinococcus radiodurans* est plus longue que le temps mis par des météorites martiennes pour arriver sur Terre. Et non plus courte comme indiqué par erreur (S. et A. *n° 911, p. 35*).

LES INDISPENSABLES
SCIENCES ET AVENIR
La grande histoire de la PHYSIQUE
Chez votre marchand de journaux
Et aussi sur smartphone et tablette

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Le fait scientifique et le choix citoyen

« *Notre planète approche à grands pas de points de basculement qui rendront le chaos climatique irréversible. Nous sommes sur une autoroute vers l'enfer climatique, avec le pied toujours sur l'accélérateur.* » La perspective esquissée par António Guterres, le secrétaire général de l'Organisation des Nations unies, dans le cadre de la COP27, est pour le moins sombre. Les chiffres sont là. Loin de diminuer, les émissions de CO_2 d'origine fossile ont augmenté de 1 % en 2022 par rapport à l'année précédente. Si l'on poursuit la trajectoire actuelle, le réchauffement sera compris entre + 2,4 °C et + 2,8 °C en 2100 par rapport à l'ère préindustrielle. Seulement, dépasser + 2 °C aura des effets en cascade dont on peine à mesurer l'ampleur, découvrent les scientifiques *(p. 42)*.
Mais comme l'écrivait Paul Claudel, *« le pire n'est pas toujours sûr »*.

> Les climatologues ne se contentent pas de nous mettre face à des chiffres alarmants, ils pointent aussi des solutions

Les climatologues ne se contentent pas de nous mettre face à des chiffres alarmants, ils pointent aussi des solutions qui permettraient rien de moins que… d'inverser le réchauffement *(p. 46)* ! Mais qui le sait ? Aussi, c'est un travail totalement inédit que vous propose ce mois-ci *Sciences et Avenir-La Recherche* : une recension des leviers les plus efficaces pour y parvenir, secteur par secteur. La bonne nouvelle, c'est que nous n'avons eu aucun mal à trouver des solutions solidement documentées par les scientifiques. La difficulté aura été de faire un choix pour mettre en avant celles qui permettront d'atteindre des points de basculement positifs cette fois, c'est-à-dire à même de déclencher des effets favorables en cascade. Les adopter aura un coût, mais il s'agit de dépenses qui seront rentables à long terme, disent les investisseurs. Le travail du scientifique, comme celui du journaliste, s'arrête ici. Le choix de l'action est du ressort du citoyen et du politique. Nous espérons simplement que la lecture de notre magazine aide chaque mois à prendre des décisions de façon plus éclairée. ■ @mathieu_nowak

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (12 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Hugo JALINIÈRE (actualités, médecine) - 01.55.35.56.52
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78 Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27 Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Bernadette ARNAUD, Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH
Ont participé à ce numéro C. BELL, P. BERLOQUIN, F. ELMALEH, P. KALDY, C. MANIÈRE
Secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Maquette Horia BAHRI - 01.55.35.56.19
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Clémence BAUDOIN - responsable projets digitaux
Jessica RIOS - cheffe de projet digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines Mélanie HENOU - mhenou@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH

Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOUREAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte un encart « Montre Chronographe-Sophia Boutique », un message « Linvoges » ainsi qu'une lettre de « bienvenue aux abonnés » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés ; un message « Paris-Match », un « encart « Art et Vie-Cultivez l'art de voyager » jetés sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0625 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par MLP.

hellio

Jusqu'à
10 000 €
d'aides

Une facture de chauffage élevée ? **Il est temps de passer à la pompe à chaleur !**

Installez une pompe à chaleur et baissez vos factures jusqu'à 35 %.

Votre énergie a de l'impact

hellio

scannez-moi

Simulez votre projet sur
particulier.hellio.com
ou au 01 87 66 61 93

Avis Vérifiés™ by Net Reviews

★★★★☆ 4,2/5

sur 4 490 avis

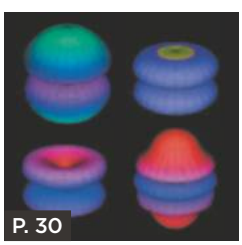
SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 912 / Février 2023

DOSSIER P. 40

Climat : inverser le cours du réchauffement

La Terre étouffe et sera bientôt invivable si le réchauffement n'est pas stoppé. Beaucoup de scientifiques estiment que nous avons les moyens non seulement de limiter le changement climatique, mais aussi de refroidir le monde. Découvrez les nombreuses solutions proposées dans ce dossier.



P. 30

Physique ultrarapide : elle fige le temps

En observant le mouvement des molécules, électrons et atomes sur des temps inférieurs à 10^{-15} seconde, les physiciens décortiquent au plus près les mécanismes de la matière. Explications.

P. 68

Médecine de guerre : innover et sauver des vies

Comment chirurgiens et réanimateurs opèrent-ils sur le terrain ? Cette médecine très particulière bénéficie désormais d'équipements de pointe et de formations inédites. Revue de détail.

P. 82

La correspondance de Charles Quint décryptée

Informaticiens, historiens et cryptographes ont réussi à décoder le système de chiffrement qui permettait à l'empereur de communiquer, dans une période de fortes tensions avec François Ier.

3 **Éditorial** par Dominique Leglu

4 **Courrier**

5 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

8 **ACTUALITÉS** Une percée historique pour la fusion nucléaire / Le plus grand radiotélescope du monde / Les jets de ketchup expliqués par la physique

30 **Physique ultrarapide : elle fige le temps**

36 **Les promesses de la sismologie planétaire**

NATURE

14 **ACTUALITÉS** Un satellite vigie des eaux de la Terre / L'île d'Ouessant vers l'autonomie énergétique / Pourquoi les émissions de méthane ont bondi en 2020

64 **Les populations locales, gardiennes de la biodiversité**

SANTÉ

18 **ACTUALITÉS** Comment le froid favorise le rhume / La dépression vient aussi du ventre / La carte mondiale de l'antibiorésistance

68 **Médecine de guerre : innover pour sauver des vies**

73 **Quand bébé devient un être conscient**

76 **Nutrition : faut-il se laisser tenter par les boissons sans alcool ?**

78 **Dossier spécial soin des cheveux**

HISTOIRE

24 **ACTUALITÉS** Un chanoine bâtisseur sous Notre-Dame / Les révélations des égouts du Colisée / Un riche collier du Moyen Âge

82 **Cryptographie : la correspondance codée de Charles Quint n'a plus de secrets**

87 **Toutankhamon : les petits arrangements d'un grand égyptologue**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

92 **C'est à voir**

93 **Le ciel de février**

94 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Sylvie Benzoni / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Jeux**

ALESSANDRO GANDOLFI/PARALLELOZERO - ATTOLAB/CEA PARIS SACLAY - BRUNO BOURGEOIS - COURTESY MEHAD - ERIC VANDEVILLE / AKG IMAGES

Le National Ignition Facility situé à Livermore (États-Unis), grand comme trois terrains de football, est le laser le plus puissant au monde.

DAMIEN JEMISON/LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY/AFP

Une percée historique pour la fusion nucléaire

En fusionnant des noyaux atomiques grâce à un laser géant, des chercheurs américains ouvrent la voie au développement d'une nouvelle énergie.

Après treize années d'efforts, les chercheurs du Laboratoire national Lawrence Livermore (Californie, États-Unis) sont parvenus à atteindre l'ignition, processus où la fusion de noyaux atomiques produit davantage d'énergie qu'elle n'en consomme. « *Un exploit historique* » annoncé par la secrétaire d'État américaine à l'Énergie, Jennifer Granholm, le 13 décembre 2022 à Washington. Voilà soixante-dix ans en effet que la communauté scientifique espérait produire en laboratoire et de manière contrôlée un tel phénomène, qui se déroule aussi bien au cœur des étoiles que dans les armes thermonucléaires (bombes H), et conduit les noyaux d'hydrogène à fusionner en libérant des quantités phénoménales d'énergie.

Des défis techniques et scientifiques en quantité

Pour parvenir à ce résultat, les chercheurs ont utilisé le National Ignition Facility (NIF), le laser le plus puissant au monde, focalisant ses 192 faisceaux sur une cavité de la taille d'un dé à coudre constituée d'or et d'uranium appauvri. Cette cavité émet alors des rayons X en son sein, qui chauffent une capsule sphérique de 2 millimètres de large où se trouvent les noyaux d'hydrogène à fusionner. En implosant, la capsule génère des niveaux de pression et de température plus importants que ceux qui règnent au centre du Soleil. Lorsque la construction du NIF a été finalisée en 2009, ses responsables pensaient parvenir à l'ignition en deux ou trois ans. « *Mais l'objectif s'est révélé beaucoup plus difficile à atteindre, quantité de défis scientifiques et techniques devant être surmontés* », rappelle Erik Lefebvre, responsable au Commissariat à l'énergie atomique (CEA) des expériences laser-plasma du Laser Mégajoule, installation située près de Bordeaux, assez similaire au NIF, qui devrait être achevée en 2027. Outre les matériaux de la capsule qui ont été modifiés, « *la taille des trous par lesquels les faisceaux pénètrent dans la cavité a été diminuée afin de laisser s'échapper moins de rayons X et accroître ainsi l'efficacité de la chaudière* », précise le chercheur. Résultat : portés à la puissance de 2,05 mégajoules, les lasers ont permis de libérer 3,15 mégajoules d'énergie de fusion, soit un gain de 153 %. Nous reviendrons très largement dès le prochain numéro sur cette prouesse inédite et les perspectives qu'elle ouvre pour l'exploitation de l'énergie de fusion dans des applications civiles et industrielles. ■ **F. D.**

Perseverance sème ses échantillons

Ces prélèvements de roche martienne seront expédiés sur Terre lors d'une prochaine mission.

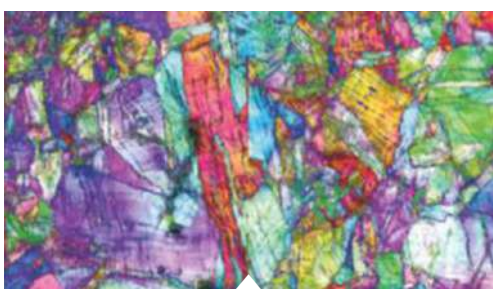
NASA/JPL-CALTECH/MSSS

Insérés dans des tubes en titane, les échantillons martiens doivent être rapportés sur Terre dans le cadre de la mission Mars Sample Return.

C'est fait ! Le rover Perseverance a réalisé ses premiers dépôts de sol martien sur la planète Rouge. Une étape clé dans la mission de retour d'échantillons sur Terre, baptisée Mars Sample Return *(lire* S. et A. *n° 881/882)*. Cette carotte fait partie d'une réserve de secours, au cas où le programme prévu pour d'autres tubes échouerait. L'échantillon a été prélevé le 31 janvier 2022 et était, depuis, stocké dans le « ventre » du rover en compagnie de 17 autres — dont un échantillon atmosphérique — récupérés jusqu'ici. Entreposé dans un petit tube en titane de la taille d'une craie, il se compose de roches ignées (magma solidifié) récupérées dans une région du cratère martien Jezero appelée « South Séítah ». Dix tubes en tout constitueront le dépôt de secours, au cas où la livraison des autres par le rover subirait un échec. Dans ce cas, deux hélicoptères viendront récupérer les dépôts pour les apporter à l'atterrisseur SRL (Sample Retrieval Lander) avant de les expédier vers la Terre. **J. I.**

EN DEUX MOTS

SATELLITE Une résolution des Nations unies enjoint les États membres à ne plus procéder à des essais de missiles antisatellites à visée destructrice. **ASTÉROÏDE** La Nasa a validé la construction d'un télescope spatial, NEO Surveyor, destiné à recenser les géocroiseurs de plus de 140 m menaçant potentiellement la planète. **INTERNATIONAL** Les 22 pays membres de l'Agence spatiale européenne ont décidé de poursuivre la mission ExoMars d'étude de l'atmosphère martienne, menacée par le gel des collaborations avec la Russie.



ROBERT RITCHIE/BERKELEY LA

L'alliage de chrome, de cobalt et de nickel (vu ici au microscope lors d'un essai sous contrainte à - 253 °C).

Record de ténacité pour le CrCoNi

CHIMIE Un alliage malléable et résistant, composé de chrome, de cobalt et de nickel, bat tous les records de « ténacité » — la capacité d'un matériau à s'opposer à la propagation des fissures. Le secret tient dans la structure de l'alliage, qui se modifie à mesure qu'il plie. Les grains cristallins glissent tout d'abord les uns au-dessus des autres, les architectures atomiques passant ensuite d'une géométrie cubique à hexagonale. **F. D.**

SOURCE : DONG LIU, UNIVERSITÉ DE BRISTOL, ROYAUME-UNI.

Pas d'anomalie du modèle standard au LHC

PHYSIQUE Le méson B rentre dans le rang. Contrairement à ce qu'indiquait une étude publiée dans *Nature Physics* en mars 2021 *(lire* S. et A. *n° 893, p. 58)*, cette particule respecte bien le modèle standard. Selon celui-ci, le méson B peut se désintégrer de différentes façons, mais elles sont toutes équiprobables. Or l'une d'elles, la voie électron-positron, semblait privilégiée. Un nouveau résultat s'appuyant sur davantage de mesures montre qu'en fait, il n'en est rien. F. N.

SOURCE : RENATO QUAGLIANI, EPFL, SUISSE.

Échec du premier vol de Vega-C

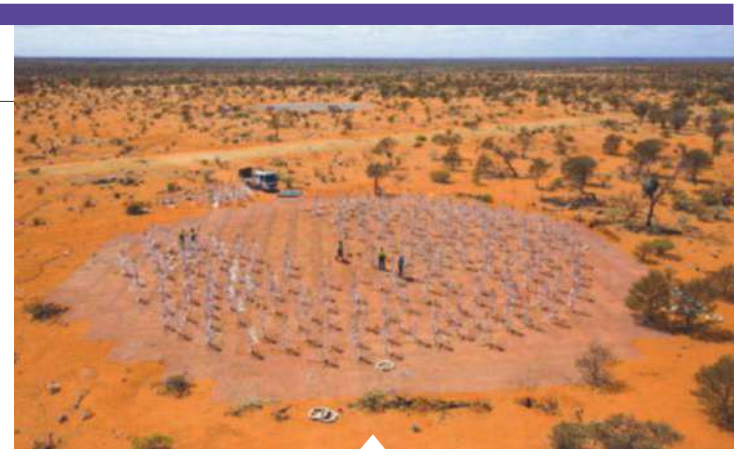
AFP/SIPA

Le lanceur européen a été perdu peu après son décollage de Kourou le 21 décembre dernier.

ESPACE Coup dur pour l'Europe dans sa course à l'espace : le premier vol commercial de la nouvelle fusée Vega-C s'est soldé par un échec. La trajectoire du lanceur a dévié peu après son décollage, le 21 décembre dernier du Centre spatial de Kourou (Guyane), en raison d'une anomalie survenue dans le deuxième étage. Faute d'accès au lanceur Soyouz et en raison du report à fin 2023 d'Ariane 6, l'Agence spatiale européenne devra désormais se tourner vers SpaceX pour ses lancements. **H. J.**

Le plus grand radiotélescope du monde

La construction du Square Kilometer Array Observatory a commencé en Australie.



ICRAR/CURTIN

SKA-Low, qui sera doté de 131 072 antennes (ici en construction en Australie), fonctionnera en réseau avec un second télescope installé, lui, en Afrique du Sud.

Trente ans après la naissance de ce projet impliquant 16 pays dont la France, la construction du Square Kilometer Array Observatory a enfin débuté. SKAO devrait devenir le plus grand radiotélescope du monde lors de sa mise en service prévue en 2028, grâce à ses dizaines de milliers de structures réceptrices fonctionnant en réseau sur deux sites. Le premier (SKA-Low), dans l'ouest de l'Australie, sera composé de 131 072 antennes, qui capteront des ondes radio basse fréquence, entre 50 et 350 mégahertz. Le second site (SKA-Mid), en Afrique du Sud, abritera 196 paraboles pour détecter des signaux allant jusqu'à 15,4 gigahertz. À terme, cet instrument permettra de « *suivre la naissance et la mort des galaxies, rechercher de nouveaux types d'ondes gravitationnelles et repousser les limites de ce que nous savons de l'Univers* », a déclaré Sarah Pearce, directrice de SKA-Low. **F. D.**

MATYÁS BOHÁCEK ET AL.

Débusquer les deepfakes politiques à coup sûr

CYBERGUERRE Des chercheurs ont mis au point une technique de détection de vidéos truquées de personnalités politiques. Elle consiste à définir un modèle authentique pour une identité précise à partir de trois critères captés sur des vidéos authentiques : mouvements faciaux, gestuelle et acoustique de la voix. Testée sur des *deepfakes* du président ukrainien Zelensky *(photo)*, l'approche permet de débusquer les faux à 100 %. **A. D.**

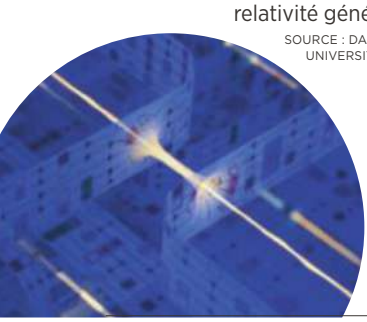
SOURCE : HANY FARID, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À BERKELEY, ÉTATS-UNIS.

Première simulation d'un trou de ver

PHYSIQUE L'ordinateur quantique Sycamore 2 de Google a été utilisé par des physiciens américains pour simuler un trou de ver, un objet hypothétique reliant deux trous noirs. À l'aide d'un modèle simplifié à une dimension, ils ont montré qu'une information transitant d'un trou noir à l'autre n'était pas altérée. L'objectif est de comprendre et tester la gravité quantique, qui tente de concilier physique quantique et relativité générale. **F. N.**

SOURCE : DANIEL JAFFERIS, UNIVERSITÉ HARVARD, ÉTATS-UNIS.

INQNET/A. MUELLER



L'ordinateur quantique a permis de « téléporter » de l'information d'un trou noir à un autre (vue d'artiste).

1000 tonnes

La masse de matière arrachée à l'astéroïde Dimorphos

ESPACE Selon de nouvelles analyses, la collision de la sonde Dart, 550 kg, avec l'astéroïde Dimorphos, 4,8 millions de tonnes, lors du premier test de déviation d'un astéroïde conduit avec succès par la Nasa le 27 septembre dernier *(lire* S. et A. *n° 909),* a projeté dans l'espace un million de kilogrammes de matière. H. J.

I-24 MOTION

L'expérimentation, filmée, a eu lieu à Nashville (États-Unis).

Des voitures autonomes contre les embouteillages

TRANSPORT La plus vaste expérimentation de véhicules autonomes en conditions réelles a eu lieu entre le 14 et le 18 novembre 2022, avec 97 voitures sans conducteur insérées sur l'interstate 24 à Nashville (États-Unis). Les premières analyses des flux vidéo de cette autoroute confirment que quelques voitures suffisent à modifier la circulation pour faire disparaître les embouteillages « en accordéon ». **A. D.**

SOURCE : ALEXANDRE BAYEN, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À BERKELEY, ÉTATS-UNIS.

Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

institut Curie

ENSEMBLE, PRENONS
LE CANCER DE VITESSE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.
Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
Code postal : |_|_|_|_|_|
Ville : .....
Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

SA1122

Les ondes gravitationnelles, signatures de vaisseaux extraterrestres

ASTROPHYSIQUE La sensibilité des détecteurs d'ondes gravitationnelles Virgo (Italie) et Ligo (États-Unis) permettrait de repérer d'éventuels vaisseaux extraterrestres. À condition de peser autant que Jupiter et d'accélérer jusqu'à 10 % de la vitesse de la lumière, ceux-ci émettraient en effet de telles ondes et deviendraient détectables depuis la Terre. **F. N.**

SOURCE : LUKE SELLERS, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À LOS ANGELES, ÉTATS-UNIS.

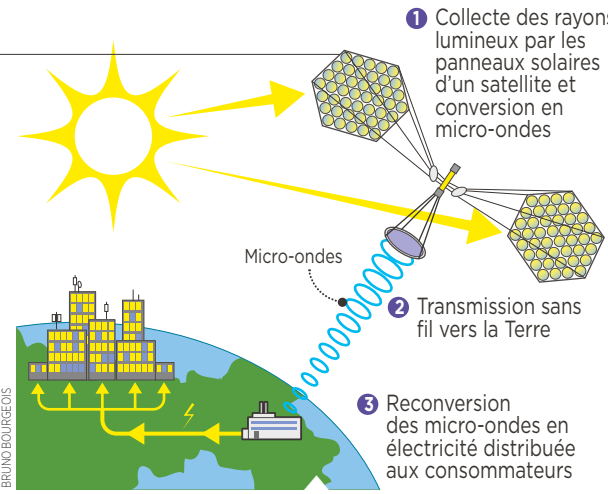
La recette pour des bulles parfaites

PHYSIQUE En collaboration avec des artistes ayant révélé leurs recettes pour obtenir des bulles de savon parfaites, une équipe de physiciens a établi les proportions idoines du mélange. Outre l'eau, la formule doit contenir 4 % de liquide vaisselle, 0,05 % à 0,1 % de polymère et 10 % de glycérol. Le polymère stabilise les bulles tandis que le glycérol, lui, augmente leur longévité. **H. J.**

SOURCE : SANDRINE MARIOT, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY, FRANCE.

SERGE GUICHARD/CNRS

La stabilité des bulles de savon est obtenue grâce à une formule très précise (ici, un chercheur du CNRS créant plusieurs bulles imbriquées).


1 Collecte des rayons lumineux par les panneaux solaires d'un satellite et conversion en micro-ondes
Micro-ondes
2 Transmission sans fil vers la Terre
3 Reconversion des micro-ondes en électricité distribuée aux consommateurs

BRUNO BOURGEOIS

Le système Solaris prévoit un transfert de l'énergie par micro-ondes.

Bientôt des centrales solaires en orbite

ÉNERGIE Le projet Solaris prévoit d'installer des panneaux solaires en orbite à 36 000 km d'altitude pour alimenter la Terre. Il a été approuvé lors de la dernière réunion des ministres de l'Espace des 22 pays membres de l'Agence spatiale européenne. Chargé de mener à bien le projet, Airbus en a démontré la faisabilité en transférant sans fil, par micro-ondes, l'énergie récoltée entre deux points éloignés de 36 m sur Terre. **H. J.**

6 % La part d'astéroïdes similaires à Ryugu composant la Terre

GÉOLOGIE De nouvelles analyses des échantillons de l'astéroïde Ryugu, rapportés sur Terre en 2020, ont permis de déterminer très finement ses contenus en métaux, notamment les isotopes de cuivre et de zinc. Ils confirment que Ryugu s'apparente à une classe de météorites nommées « chondrites CI ». Ce type d'astéroïdes aurait contribué à près de 6 % de la masse totale de la Terre. **F. D.**

SOURCE : MARINE PAQUET, INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS, FRANCE.

Les jets de ketchup expliqués par la physique

Des chercheurs donnent une explication au phénomène d'expulsion en rafales des dernières gouttes de sauce dans une bouteille en plastique presque vide.

À l'université d'Oxford (Royaume-Uni), des physiciens ont découvert que le phénomène d'éjection en rafales du ketchup selon un flux très irrégulier se manifeste au-delà d'un seuil critique, lequel dépend de plusieurs paramètres comme la quantité d'air présent dans la bouteille, le taux de compression de la sauce, ou encore le diamètre de la buse servant à l'expulser. Au-delà de ce point de bascule, la force qui s'exerce sur le condiment diminue en effet moins vite que celle — dite de traînée visqueuse — générée par les parois de la bouteille. L'air se trouve alors surcomprimé, ce qui engendre un effet de ressort faisant gicler ce qui reste de liquide. Pour l'éviter, il suffit de presser plus doucement la bouteille, d'utiliser une buse moins étroite ou d'enlever tout simplement le bouchon afin de récolter les dernières gouttes de sauce. **F. D.**

GETTY IMAGES

Le phénomène d'éjection dépend de l'équilibre entre la force de compression de la sauce et celle générée par les parois de la bouteille.

LA CITÉ DE LA MER

CHERBOURG

UNE ÉMOTION **VIVANTE** DEPUIS 20 ANS

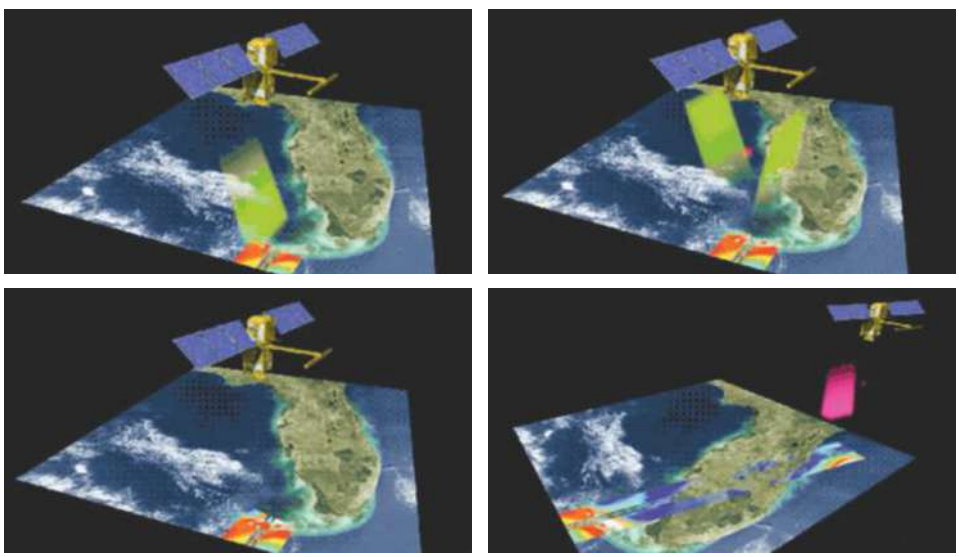
LE MONUMENT PRÉFÉRÉ DES FRANÇAIS 2022

CITEDELAMER.COM

ÅSGARD | www.asgard-media.fr

Un satellite vigie des eaux de la Terre

À plus de 800 kilomètres d'altitude, Swot étudiera notamment la circulation océanique et surveillera le débit des fleuves.



NASA/JPL-CALTECH

Les deux antennes radars du satellite permettent de collecter des données sur une bande de 120 km de large (ici reconstitution au-dessus de la Floride, aux États-Unis).

Dès l'été prochain, les scientifiques auront une carte renouvelée tous les dix jours de la topographie des eaux de surface océaniques et continentales — lacs et cours d'eau — à l'échelle de la planète. Une première rendue possible grâce au succès du lancement, le 16 décembre dernier, du satellite franco-américain Swot (Surface Water and Ocean Topography) par le Cnes et la Nasa.

Cette vision quasi exhaustive et dynamique des plans d'eau mondiaux saisie à 890 kilomètres d'altitude permettra d'affiner les modèles du cycle de l'eau en relation avec le climat. Équipé notamment d'un altimètre et d'un radiomètre micro-ondes, Swot bénéficie par ailleurs d'une fauchée observationnelle de 120 km de large grâce à deux antennes radars permettant de reconstituer des images en trois dimensions. Cela permet d'atteindre une résolution 10 fois supérieure aux technologies existantes.

Il sera ainsi possible de surveiller le débit des fleuves de largeur supérieure à 100 mètres et d'évaluer les stocks d'eau douce disponibles. Des données cruciales lorsqu'on sait que 70 % de l'eau douce accessible est utilisée pour l'agriculture et 22 % pour l'industrie et que la moitié de la population mondiale connaît déjà de graves pénuries d'eau.

Une résolution de 10 à 20 kilomètres

En survolant les océans, Swot étudiera, avec une résolution de 10 à 20 km, les structures fines de la circulation océanique et leurs échanges avec l'océan profond, dont l'impact sur la vie marine est méconnu. Enfin, ce nouvel observatoire de l'eau terrestre permettra de suivre le comportement des littoraux et de leurs écosystèmes à l'heure de la montée du niveau des mers. ■ **S. R.**

3013

Le nombre de neurones dans le cerveau d'une drosophile

BIOLOGIE En découpant le cerveau d'une jeune mouche des fruits (*Drosophila melanogaster*) en 4841 tranches, des chercheurs ont créé le plus grand « connectome » de cerveau entier décrit à ce jour. La cartographie comprend ainsi 3013 neurones et quelque 544 000 synapses. **H. J.**

SOURCE : M. WINDING, UNIVERSITÉ DE CAMBRIDGE, ROYAUME-UNI.

Ces grenouilles cachent leurs globules rouges pour dormir

HERPÉTOLOGIE Déjà surnommée « grenouille de verre » en raison de sa face ventrale transparente laissant voir ses organes, *Hyalinobatrachium fleischmanni* est capable de stocker 89 % de ses globules rouges dans le foie lorsqu'elle s'endort sur les feuilles vertes. Elle se rend ainsi quasiment invisible. **H. J.**

SOURCE : CARLOS TABOADA, UNIVERSITÉ DUKE, ÉTATS-UNIS.

JESSE DELIA

« Hyalinobatrachium fleischmanni » devient plus transparente lorsqu'elle dort.

L'étonnante résistance aux chocs de la « graine » du ginkgo biloba

BOTANIQUE L'extrême résistance aux chocs de la coque interne du fruit de ginkgo biloba est due à une structure microscopique très ordonnée. La paroi des cellules est formée de microfibrilles de cellulose agencées en hélices, transmettant les tensions à travers des conduits et dissipant localement leur énergie. Une disposition unique encore hors de portée des nanotechnologies. **P. K.**

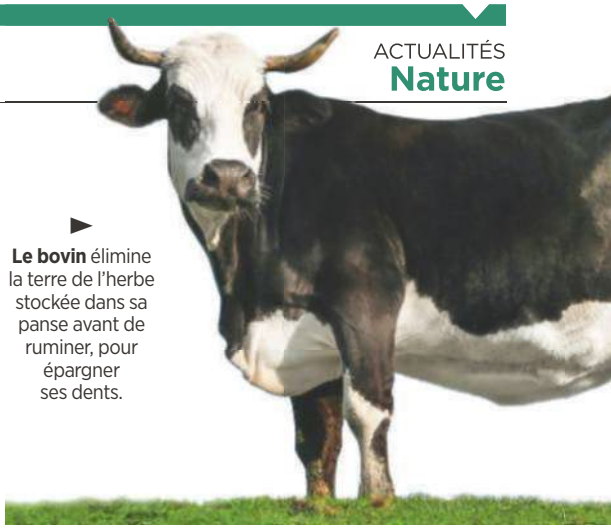
SOURCE : YUANYUAN ZHANG, UNIVERSITÉ DE PÉKIN, CHINE.

FREDERIK/IMAGEBROKER/BIOSPHOTO

La paroi interne de la coque du fruit, à la structure unique, lui confère une résistance extrême.

Une ferme à insectes à Amiens

ALIMENTATION
La plus grande ferme verticale à insectes du monde entre en activité à Amiens ! Il s'agit d'un bâtiment haut de 36 m pour 40 000 m² de surface, qui va se remplir de scarabées molitor et buffalo pour l'alimentation des porcs, volailles, poissons et plantes dans un premier temps, puis celle des humains à plus longue échéance. La société Ynsect, qui développe ce projet depuis 2011, exporte ses produits dans le monde entier. L. C.



NEW AFRICA/SHUTTERSTOCK

Le bovin élimine la terre de l'herbe stockée dans sa panse avant de ruminer, pour épargner ses dents.

Les vaches lavent leur verdure

MAMMALOGIE Pour limiter l'abrasion de leurs dents, les vaches sont capables d'éliminer la terre et les particules minérales de l'herbe qu'elles ruminent. Une étude conduite sur quatre animaux montre que c'est dans la panse que ce nettoyage s'effectue, là où ils stockent les végétaux avant de les régurgiter pour ruminer. **P. K.**

SOURCE : SARAH VALERIO, UNIVERSITÉ DE ZURICH, SUISSE.

EN DEUX MOTS

OCÉAN Une étude sur le cerveau de 22 dauphins échoués en Écosse montre que certains présentent des signes caractéristiques d'Alzheimer. **RECORD** Une équipe de char à voile de Nouvelle-Zélande a battu le record du monde de vitesse terrestre pour un véhicule utilisant l'énergie éolienne, en atteignant 222,4 km/h. **SURVEILLANCE** Des chercheurs américains ont mis au point un microcristal qui, avalé par les larves de moustiques, permet aux scientifiques d'identifier ensuite les adultes qu'ils capturent.

L'île d'Ouessant vers l'autonomie énergétique

L'énergie produite en excès par une hydrolienne est stockée sous forme d'hydrogène puis reconvertie en électricité pour les transports des îliens.

Ouessant (Finistère) vient de franchir une nouvelle étape vers son autonomie énergétique. Ses habitants ont testé en décembre dernier une flottille de vélos à assistance électrique fonctionnant avec de l'hydrogène que produit un électrolyseur alimenté par la production électrique de l'hydrolienne D10 de Sabella. Posée par 50 mètres de profondeur dans le courant du Fromveur, cette hydrolienne d'une puissance de 1 mégawatt permet, grâce à la force des marées, de couvrir au total la moitié des besoins de l'île. Lorsqu'elle produit de l'énergie en excès, celle-ci est stockée sous forme d'hydrogène, lequel peut être reconverti en électricité lorsque la production baisse ou être utilisé dans les transports. Les 800 Ouessantais ont pu ainsi essayer les vélos à hydrogène construits par une start-up bretonne. En ligne de mire : la fin des deux-roues et véhicules à essence et une autonomie énergétique de l'île prévue pour 2030. **L. C.**

JEROME HOUYVET/ONLYFRANCE

Le territoire insulaire a pour objectif d'atteindre une production d'énergie à 100 % renouvelable en 2030.

Les bienfaits des barrages de castors

HYDROLOGIE
Les castors sont une aubaine pour la qualité de l'eau des rivières, selon des hydrologues. Leurs barrages en bois élèvent les niveaux d'eau en amont, détournant les flux vers les sols environnants et les cours d'eau secondaires. Or, ces zones riveraines agissent comme des filtres pour éliminer l'excès de nutriments et de contaminants avant que l'eau ne réintègre le canal principal en aval. **R. M.**

SOURCE : S. FENDORF, UNIVERSITÉ DE STANFORD, ÉTATS-UNIS

ALAIN MAFART-RENODIER / BIOSPHOTO

Les constructions du rongeur permettent de filtrer l'eau des rivières.

PHOTOZ/AGEFOTOSTOCK/ADOBESTOCK/LIFEPHOTO

Situé dans la queue, l'organe se présente comme une double petite langue de chair.

Les serpents femelles ont un clitoris

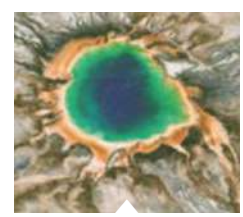
ZOOLOGIE
Les scanners de neuf serpents femelles ont révélé la présence, dans leur queue, d'une double petite langue de chair, en forme de cœur, non loin des glandes odorantes qui servent à attirer les partenaires. Les hémipénis fourchus des mâles sont étudiés depuis des décennies, mais l'organe du plaisir femelle avait été négligé. Les hémiclitoris ont été identifiés chez des spécimens des quatre principales lignées de serpents. **R. M.**

SOURCE : MEGAN FOLWELL, UNIVERSITÉ D'ADÉLAÏDE, AUSTRALIE

Deux fois plus de lave dans le volcan Yellowstone

VOLCANOLOGIE Le réservoir de magma sous la caldeira du Yellowstone (États-Unis), l'un des plus grands volcans du monde, contient presque deux fois plus de roche fondue (1600 km³) qu'on ne le pensait, selon une nouvelle étude. Soit 16 à 20 % du réservoir total, mais encore loin des 35 à 50 % nécessaires à une éruption majeure. **H. J.**

SOURCE : ROSS MAGUIRE, UNIVERSITÉ DE L'ILLINOIS, ÉTATS-UNIS



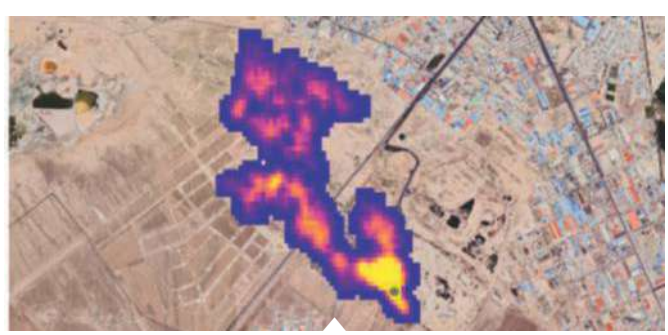
MT K KRAFFT/IMAGEEST/GAMMA-RAPHO

1600 km³ de magma se cachent sous la caldeira du volcan américain.

Pourquoi les émissions de méthane ont bondi en 2020

Avec la crise du Covid-19, le quasi-arrêt de l'économie mondiale a réduit les émissions d'un gaz qui détruit le méthane.

Alors que les teneurs en méthane dans l'atmosphère augmentaient de 10 parties par milliards (ppb) depuis la fin des années 2000, les satellites ont enregistré un bond à 15 ppb en 2020. Comment expliquer cette explosion du deuxième plus puissant gaz à effet de serre derrière le CO_2 ? La faute au climat et… au Covid-19, selon une équipe franco-chinoise qui a résolu l'énigme dans *Nature*. Le quasi-arrêt de l'économie mondiale a réduit les émissions d'oxyde d'azote (NOx) de 6 %. Or, ce gaz irritant est aussi un précurseur des radicaux hydroxyles (OH), des éléments extrêmement réactifs qui détruisent 85 % du méthane émis chaque année. Moins de OH a donc provoqué plus de méthane. Par ailleurs, année chaude et humide, 2020 a connu une intense activité de décomposition par les bactéries dans les zones humides, lacs et rivières, ce qui a aussi contribué au phénomène. Les chercheurs en concluent que, plus que jamais, la lutte contre les fuites de méthane devient urgente. **L. C.**



NASA/JPL-CALTECH/AFP

Ce panache de méthane d'au moins 4,8 km de long est émis par une importante décharge à ciel ouvert au sud de l'Iran (image satellite).

14,5 °C

Le record de température moyenne annuelle en France

MÉTÉOROLOGIE
2022 se classe bien au premier rang des années les plus chaudes en France depuis le début des relevés en 1900, loin devant le précédent record de 14,07 °C atteint en 2020. Météo France a confirmé qu'il s'agissait d'un *« symptôme du réchauffement climatique »*. H. J.

SI ON A 51 GRANDS CRUS

CE N'EST PAS
POUR LES BOIRE DANS
LA MÊME SOIRÉE

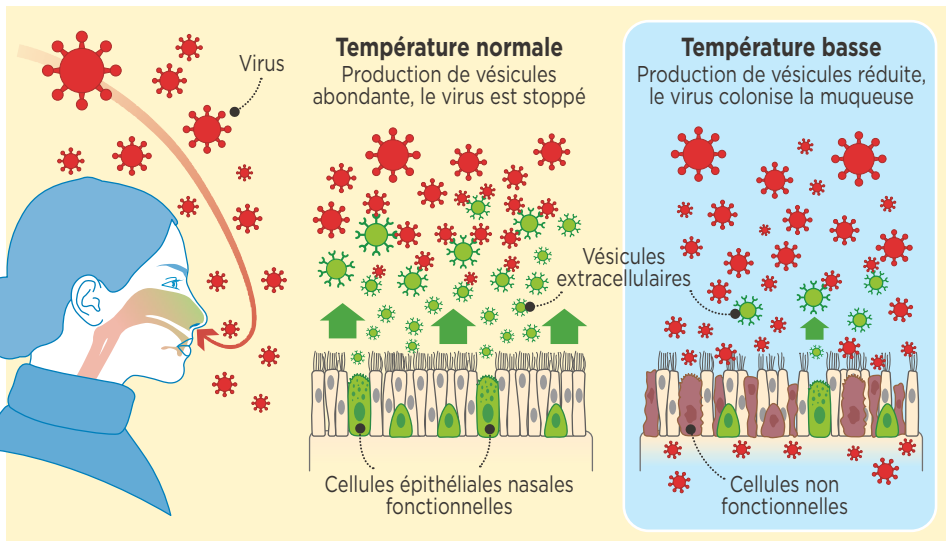
VA VINS ALSACE

Tant de personnalité(s) en responsabilité

L'ABUS D'ALCOOL EST DANGEREUX POUR LA SANTÉ, À CONSOMMER AVEC MODÉRATION

Comment le froid favorise le rhume

L'air froid accroît le risque d'infection virale car une simple petite baisse de température dans le nez fait perdre la moitié de l'immunité.



BRUNO BOURGEOIS

Si les températures basses favorisent les rhumes et autres infections respiratoires, c'est parce qu'elles neutralisent dans le nez des vésicules extracellulaires spécialisées dans l'arrêt des virus. C'est ce que montre une équipe de l'école de médecine de Harvard (États-Unis), qui dit apporter ainsi « *la première explication plausible quantitativement et biologiquement* » de l'augmentation de l'infectiosité virale en hiver. Les chercheurs ont en effet pu mesurer *in vitro* le nombre et l'effet de ces petites vésicules en mimant des tentatives d'infection sur les cellules de la muqueuse nasale. À chaque fois, un essaim de vésicules extracellulaires est libéré par les cellules pour se lier aux particules virales et les empêcher d'infecter les cellules.

Le masque protège et réchauffe à la fois

Les chercheurs ayant évalué que la température à l'intérieur du nez chute d'environ 5 °C lorsque l'air extérieur passe de 23 °C à 4 °C, les cellules des muqueuses ont été testées à 37 °C et à 32 °C. Résultat : lorsqu'il fait froid, la production de vésicules chutait de 42 %. « *L'air froid est associé à un risque accru d'infection virale car une simple petite baisse de température dans le nez vous fait perdre la moitié de votre immunité* », résume le Dr Benjamin Bleier qui a dirigé ces recherches. L'étude réconcilie ainsi en partie l'empirisme populaire, qui recommande de « *se couvrir pour ne pas attraper froid* », et la microbiologie, qui sait qu'une infection est toujours causée par un agent infectieux et non par le froid. À ceci près que l'écharpe et le bonnet ne sont pas la solution idoine pour conserver au chaud les cellules du nez. Pour maintenir l'immunité nasale, les auteurs suggèrent plutôt… le masque ! « *Non seulement les masques protègent de l'inhalation directe de virus, mais c'est aussi comme porter un pull sur le nez* », assure Benjamin Bleier. ■ **H. J.**

17 jours

La durée maximale d'infectiosité des morts du Covid-19

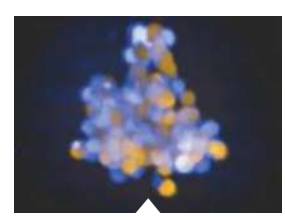
INFECTIOLOGIE Le coronavirus Sras-CoV-2 responsable du Covid-19 peut persister dans le corps des patients infectés bien après leur mort, voire se propager à d'autres, selon une étude. Des particules virales infectieuses ont ainsi pu être relevées sur un corps 17 jours après son décès. **C. M.**

SOURCE: STÉPHANIE PLENZIG, UNIVERSITÉ DE FRANCFORT, ALLEMAGNE.

Une « colle cellulaire » pour la médecine régénérative

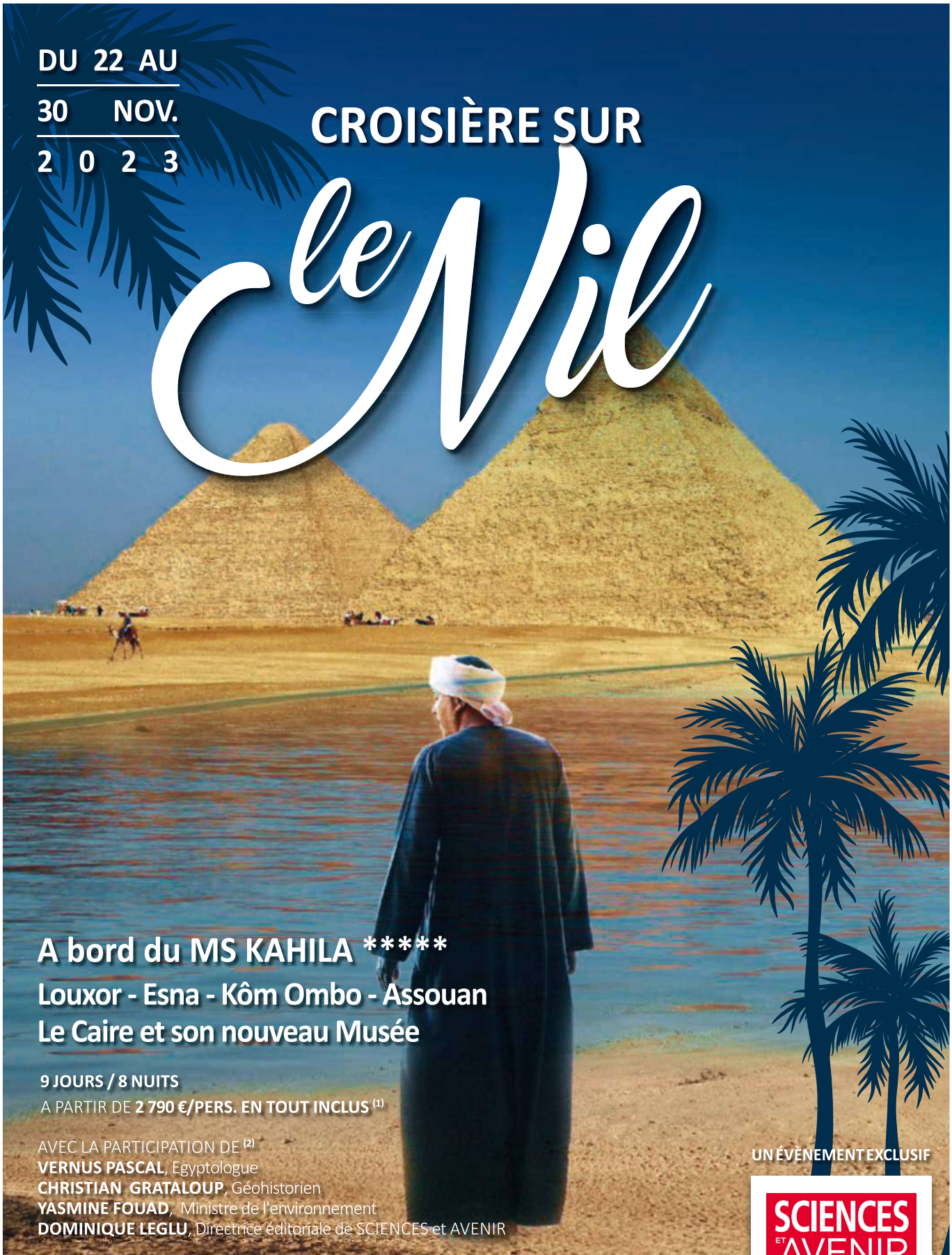
MICROBIOLOGIE Des bio-ingénieurs ont mis au point une molécule synthétique agissant comme une « colle cellulaire », inspirée de celles qui permettent l'adhérence naturelle des cellules entre elles. Les ensembles multicellulaires complexes qu'ils ont pu former constituent une étape décisive vers la production d'organes entiers. **C. B.**

SOURCE : A. STEVENS, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE, SAN FRANCISCO, ÉTATS-UNIS.



UNIVERSITY OF CALIFORNIA SAN FRANCISCO

Molécules d'adhérence cellulaire synthétiques (modélisation).


DU 22 AU
30 NOV.
2023
CROISIÈRE SUR
le Nil
A bord du MS KAHILA *****
Louxor - Esna - Kôm Ombo - Assouan
Le Caire et son nouveau Musée
9 JOURS / 8 NUITS
A PARTIR DE 2 790 €/PERS. EN TOUT INCLUS (1)
AVEC LA PARTICIPATION DE (2)
VERNUS PASCAL, Egyptologue
CHRISTIAN GRATALOUP, Géohistorien
YASMINE FOUAD, Ministre de l'environnement
DOMINIQUE LEGLU, Directrice éditoriale de SCIENCES et AVENIR
UN ÉVÈNEMENT EXCLUSIF
SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

Retrouvez tous les détails de ce voyage exceptionnel sur www.sa-egypte.fr
Renseignements | Tél. 01 84 76 22 35 | collection-infini@mycomm.fr

(1) Voir détails sur la brochure (2) Sous réserve de disponibilité

SARL Mycomm - 40 avenue Raspail - 94250 Gentilly • Immatriculation Atout France IM094100035 • Assurances Professionnelles by Hiscox - Tourisme Pro n° RCE1006 et n° RC1006-PJ0116 • Agence garantie par l'APST • RCS 510 368 400

PATRICK CAMPBELL / UNIVERSITÉ DU COLORADO

Le laser a révélé les panaches d'aérosol éjectés des toilettes.

La chasse d'eau, diffuseur d'ambiance bactérienne

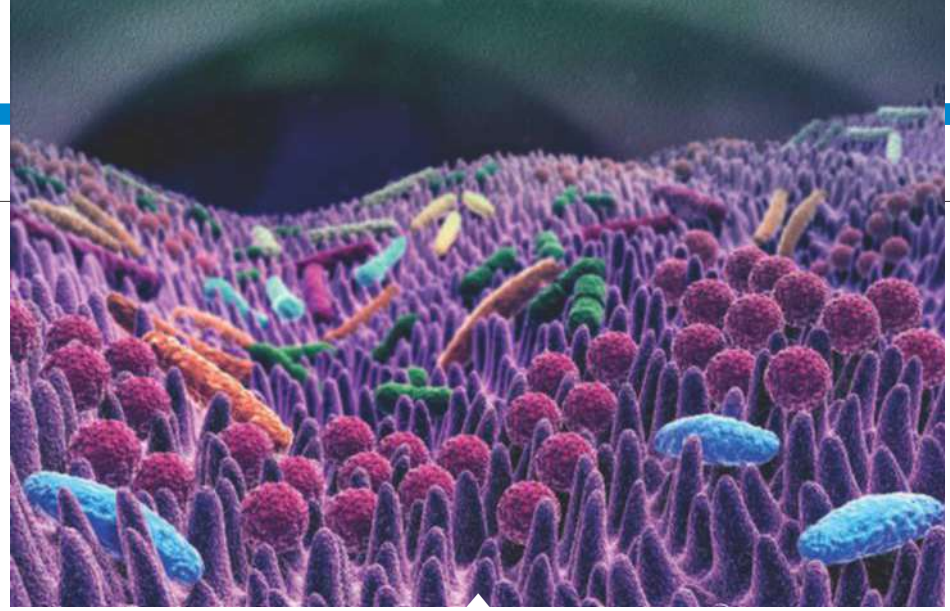
MICROBIOLOGIE À chaque chasse d'eau tirée sans le couvercle, des panaches d'aérosol se répandent jusqu'au plafond, viennent d'observer des chercheurs. Autour d'une cuvette installée dans leur laboratoire, deux lasers révèlent la position des gouttelettes, leur vitesse et leur direction. Si les plus grosses retombent vite, celles de 10 micromètres restent en suspension, potentiellement porteuses de virus et de bactéries. **C. G.**

SOURCE : J. CRIMALDI, UNIVERSITÉ DU COLORADO, ÉTATS-UNIS.

La signature génétique du sixième sens

GÉNÉTIQUE Des chercheurs ont identifié des marqueurs génétiques propres aux neurones impliqués dans notre sens le moins connu : la proprioception, qui permet au cerveau de coordonner nos mouvements et de percevoir la position du corps dans l'espace. Les scientifiques espèrent qu'une carte d'identité des neurones proprioceptifs permettra d'améliorer la conception des neuroprothèses. **C. M.**

SOURCE : STEPHAN DIETRICH, CENTRE MAX-DELBRÜCK, ALLEMAGNE.



SIMONE ALEXOWSKI / SPL / SUCRE SALÉ

Des bactéries intestinales ont été associées à l'apparition de symptômes dépressifs (illustration).

La dépression vient aussi du ventre

La perte de diversité bactérienne modifierait l'équilibre de molécules essentielles à l'organisme.

Treize familles de bactéries intestinales ont pu être associées à l'apparition de symptômes dépressifs (négativité, perte de poids, dégradation du sommeil) par une équipe de l'université d'Amsterdam (Pays-Bas). C'est le résultat d'une analyse des microbiotes intestinaux de plus de 2500 individus. Les scientifiques relèvent que ces bactéries (*Christensenella*, *Ruminococcaceae*, *Lachnoclostridium* en particulier) sont capables de synthétiser des molécules (glutamate, butyrate, sérotonine et acide aminobutyrique) essentielles à l'organisme. Le butyrate et la sérotonine sont impliqués dans l'axe de communication intestin-cerveau, tandis que le glutamate, largement distribué dans le cerveau, est aussi un neurotransmetteur du système nerveux entérique, qui contrôle le tube digestif. C'est la perte de diversité de la flore qui rendrait leur présence nocive. **F. E.**

WIRESTOCK CREATORS / SHUTTERSTOCK

L'HYPOTHÈSE DU MOIS

L'intolérance à la gravité à l'origine du côlon irritable

GASTRO-ENTÉROLOGIE Selon une étonnante hypothèse, le syndrome de l'intestin irritable (SII) — qui touche 5 % de la population française — serait dû à une intolérance aux forces gravitationnelles. La faiblesse des structures responsables du maintien de nos viscères — muscles, tendons, ligaments — contribuerait aux diarrhées, constipations et crampes abdominales caractéristiques du SII. Pour étayer cette piste, l'étude suggère même de sonder les réactions des patients sur des montagnes russes. **C. G.**

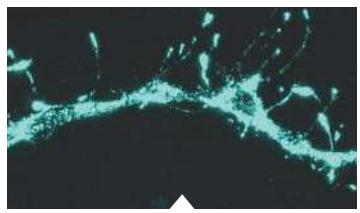
SOURCE : BRENNAN SPIEGEL, HÔPITAL CEDARS-SINAI, LOS ANGELES, ÉTATS-UNIS.

Un marqueur sanguin de la maladie d'Alzheimer

NEUROLOGIE Le dosage dans le sang d'un type de peptide dit à feuillet alpha permet de prédire la maladie d'Alzheimer plusieurs années avant les premiers symptômes, révèle une étude américaine. Ces peptides toxiques caractérisent de manière sensible et très spécifique la maladie et pourraient être utilisés pour l'élaboration d'un test de diagnostic précoce de la maladie. **P. K.**

SOURCE : DYLAN SHEA, UNIVERSITÉ DE WASHINGTON, ÉTATS-UNIS.

Des synapses endormies prêtes à créer de nouveaux souvenirs



DIMITRA VARDALAKI AND MARK HARNETT

En forme de filopodes, les synapses « silencieuses » ont été découvertes en grande quantité dans le cerveau de souris.

NEUROBIOLOGIE
À l'extrémité des ramifications neuronales, de minces filopodes inactifs se tiennent prêts à forger de nouveaux souvenirs. Ces synapses « silencieuses », découvertes en grande quantité dans le cerveau de souris adultes, serviraient de réserve activable pour enrichir la mémoire sans effacer les autres souvenirs. **F. E.**

SOURCE : DIMITRA VARDALAKI, MIT, ÉTATS-UNIS.

2603

Le nombre d'antibiotiques synthétisés par l'humain

GÉNÉTIQUE **Notre génome est équipé pour synthétiser lui-même nombre de molécules à effets antibactériens : au moins 2603 selon une étude, dont les propriétés physicochimiques ont été déduites de leur séquence par un programme informatique. Pour 56 de ces agents, les chercheurs ont pu vérifier qu'ils ont bien des capacités antibiotiques *in vitro* et *in vivo*.** **P. K.**

SOURCE : MARCELO TORRES, UNIVERSITÉ DE PENNSYLVANIE, ÉTATS-UNIS.

V. JAMONNEAU/IRD

L'acoziborole, efficace à 96 % en dose unique, pourrait permettre l'éradication prochaine de la maladie (ici un dépistage).

Un comprimé contre la maladie du sommeil

INFECTIOLOGIE
Un médicament laisse espérer l'éradication avant 2030 de la maladie du sommeil, transmise par la mouche tsé-tsé. L'acoziborole (Sanofi), un traitement en prise unique par voie orale, s'avère aussi efficace que les traitements intraveineux habituels. Dans l'essai publié par *The Lancet*, 100 % des patients atteints d'une forme précoce ou intermédiaire de la trypanosomiase n'ont plus de parasite détectable 18 mois après le traitement, et 96 % pour les formes avancées de cette parasitose. **S. R.-M.**

www.lesproduitsdumois.com

PERTE DE CONCENTRATION ET DE MÉMOIRE ?

Les comprimés naturels **Cerveau Clair** apportent en quelques heures des vitamines et des nutriments aux zones de la concentration et de la mémoire du cerveau.

Ils contiennent de la L-théanine issue du Thé vert, des extraits de Grenade, de Pin maritime et de Noix, ainsi que des Vitamines B et de l'Iode, dont l'efficacité pour améliorer les performances mentales et les fonctions cognitives (mémoire, attention, concentration) a été démontrée dans de nombreuses études scientifiques.

Ils protègent également le cerveau du vieillissement et réduisent la fatigue.

Cerveau Clair tonifie et revitalise le cerveau pour aider à garder les idées claires !

■ En pharmacie - Boîte de 60 comprimés - ACL 2951863 - Convient aux végétaliens - Questions ? New Nordic répond au 01 85 12 12 12 (tarif local) www.vitalco.com

RETROUVER BIEN-ÊTRE ET SÉRÉNITÉ

Zenytud est une formule à la fois puissante et naturelle, idéale en situation de mal-être et notamment de burn-out.

Elle associe des extraits végétaux concentrés (Rhodiola, Safran) à Lactium® (un ingrédient breveté) ainsi que des vitamines (B3, B6, B9) et minéraux essentiels (Magnésium).

Ensemble, ils agissent sur les neurotransmetteurs les plus importants dans les troubles anxieux (GABA, sérotonine, dopamine) tout en **favorisant des fonctions psychologiques normales, une réduction de la fatigue et une humeur positive.**

Sans effet indésirable ni accoutumance.

■ En pharmacie - Boîte de 60 gélules végétales. ACL 6024255
Plus d'infos au 01 83 96 83 01 (tarif local) - zenytud.com
Formule très concentrée, demandez un avis médical si vous prenez des médicaments.

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE
Pour paraître dans cette rubrique, R'Médias 01 46 48 85 41 - photos D.R.

L. KOBAN

QUESTIONS À

Léonie Koban

Chercheuse CNRS au Centre de recherche en neurosciences de Lyon

« Une signature neurobiologique des addictions »

Pour faciliter la prise en charge des alcooliques et des toxicomanes, une équipe franco-américaine a mis au point un outil permettant d'évaluer dans le cerveau l'intensité du manque et l'envie de rechuter.

Qu'avez-vous identifié chez les personnes dépendantes ?
Ce qu'on nomme le « craving », ce besoin irrépressible de consommer une substance, a pu être mis en évidence dans le cerveau de consommateurs, qu'ils soient alcooliques, toxicomanes ou boulimiques. Cette envie n'allume pas une zone spécifique du cerveau, mais plutôt une combinaison de différentes régions que nous avons appelée NCS, pour Neurobiological Craving Signature (signature neurobiologique du craving).

Comment êtes-vous parvenus à cette identification ?
Nous avons montré des images de drogues ou de nourritures appétissantes à 99 participants. Ceux-ci devaient évaluer à quel point ils avaient envie du produit présenté. Au moyen d'un logiciel d'apprentissage automatique, nous avons pu corréler ces envies avec les zones du cerveau qui s'activaient à l'IRM.

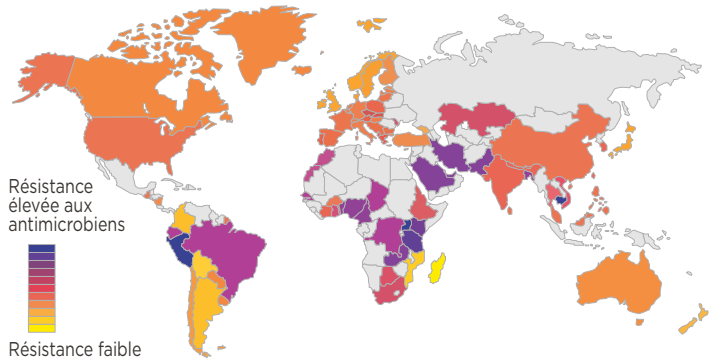
Quelles vont être les suites de ce travail ?
Nous allons affiner cette signature, mais aussi étudier la variabilité des réponses entre hommes et femmes pour mesurer l'influence du sexe sur le NCS. Il sera aussi intéressant d'étudier l'effet de l'abstinence pour voir si la réponse cérébrale varie. Le NCS pourrait ainsi devenir un outil pour évaluer le succès d'un traitement.

Propos recueillis par H. R.

La carte mondiale de l'antibiorésistance

BACTÉRIOLOGIE Portant sur des analyses d'ADN bactérien de plus de 700 échantillons d'eaux usées de 101 pays, une étude dévoile les régions où les gènes liés à la résistance aux antibiotiques sont les plus nombreux (en gris les pays sans données). L'Afrique subsaharienne rassemble les États aux plus forts taux. Les chercheurs appellent à une surveillance mondiale de l'évolution de la situation. **C. G.**

SOURCE : P. MUNK, UNIVERSITÉ TECHNIQUE DU DANEMARK.



TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK

3050 Le nombre d'enfants américains intoxiqués au cannabis en 2021

TOXICOLOGIE Plus de 3000 enfants ont fait l'objet d'un signalement après avoir ingéré accidentellement du cannabis aux États-Unis au cours de l'année 2021. Ils n'étaient qu'un peu plus de 200 en 2017. Soit une augmentation de 1300 %, corrélée à la légalisation du cannabis récréatif dans un nombre croissant d'États américains. **H. J.**

SOURCE : MARIT TWEET, UNIVERSITÉ DU SUD DE L'ILLINOIS, ÉTATS-UNIS.

CHEO MEDIA HOUSE

Ayla, âgée aujourd'hui de 18 mois, a été guérie grâce à une intervention sur le fœtus.

PREMIÈRE MONDIALE

Une maladie génétique traitée avant la naissance

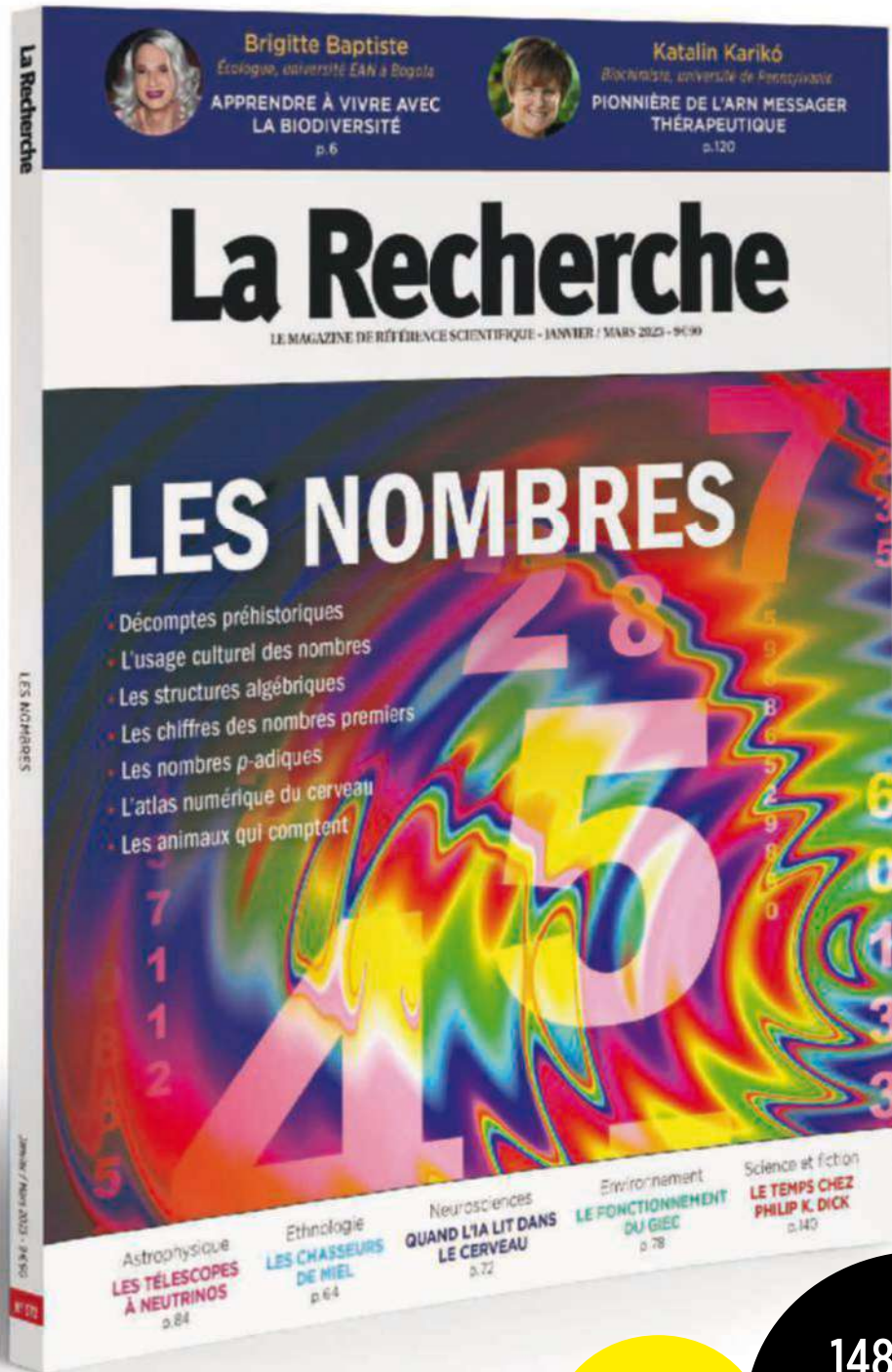
MÉDECINE Un fœtus atteint d'une maladie génétique musculaire rare et potentiellement mortelle, la maladie de Pompe, a été traité avec succès *in utero* par une enzymothérapie administrée par le cordon ombilical. Cet essai a permis à l'enfant aujourd'hui âgée de 18 mois de se développer normalement. **S. R.-M.**

SOURCE : JENNIFER COHEN, UNIVERSITÉ DUKE, ÉTATS-UNIS.

31 SCIENTIFIQUES
PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE



Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

DENIS GLIKSMAN, INRAP

L'analyse des squelettes au CHU de Toulouse a révélé que l'un d'eux est celui d'Antoine de La Porte, riche prélat qui participa financièrement au réaménagement de la clôture du chœur de Notre-Dame.

Un chanoine bâtisseur sous Notre-Dame

L'un des deux cercueils de plomb mis au jour après l'incendie dans la cathédrale a été identifié : il s'agit d'un illustre religieux mort en 1710.

L'examen des deux sarcophages en plomb découverts début 2022 lors des fouilles de la croisée du transept de Notre-Dame de Paris a livré ses premiers résultats, ont annoncé les archéologues de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap). Conduites à l'Institut médico-légal du CHU de Toulouse, les analyses ont été menées en tenue de protection pour préserver à la fois les experts d'une éventuelle intoxication au plomb et les dépouilles d'une contamination humaine.

Le premier sarcophage, qui reposait dans son caveau d'origine en pierre, a révélé une épitaphe gravée sur une petite plaque de bronze apposée sur le couvercle. Elle a livré le nom du défunt, sa fonction, la date et l'âge de son décès : « *Cy est le corps de messire Antoine de La Porte, chanoine de l'église* (mot effacé), *décédé le 24 décembre 1710 en sa 83e année. Requiescat in pace* », peut-on lire.

Le second sarcophage reste mystérieux

Les chercheurs ont ainsi pu établir qu'il s'agissait du « chanoine jubilé », surnommé ainsi pour avoir occupé ses fonctions à Notre-Dame durant plus de cinquante ans. Inhumé avec les vestiges du jubé médiéval de la cathédrale, dont de nombreux fragments ont été dégagés en 2022, il contribua notamment aux travaux de réaménagement du chœur souhaité par Louis XIII. Le second sarcophage reste quant à lui nimbé de mystère : dégagé à un niveau correspondant à des périodes pouvant aller du XIVe au XVIIe siècle, il n'a pas pu être relié à une personnalité. « *Nous savons seulement qu'il s'agit d'un homme âgé de 25 à 40 ans, qui semble avoir été cavalier dès son plus jeune âge et tout au long de sa vie* », affirme Christophe Besnier, responsable scientifique de la fouille. Il est seulement possible d'affirmer que l'homme devait bénéficier d'un statut aristocratique, étant donné son traitement mortuaire coûteux.

Après la série d'analyses prévues sur ces deux sarcophages, les chercheurs se réuniront pour mettre en commun leurs résultats et discuter de l'analyse globale. Les premiers résultats sont attendus au premier semestre 2023. ■ **M. B.**

Découverte d'une nurserie d'ichtyosaures

PALÉONTOLOGIE La présence exceptionnelle sur un site forestier aux États-Unis de 37 fossiles d'ichtyosaures, ces reptiles marins à l'allure de cétacés vieux de 230 millions d'années, a enfin une explication. Des fouilles révélant la présence d'embryons et de nouveau-nés suggèrent qu'il s'agissait d'un lieu de reproduction où les ichtyosaures sont revenus génération après génération. **J. I.**

SOURCE : NEIL KELLEY, UNIVERSITÉ VANDERBILT, ÉTATS-UNIS.

TMAG

La dépouille était cachée dans l'armoire d'un musée local.

Les restes du dernier tigre de Tasmanie retrouvés

ARCHÉOLOGIE **On les croyait perdus à tout jamais depuis quatre-vingt-cinq ans, ils reposaient en réalité dans un placard. Les restes du dernier tigre de Tasmanie connu, ou thylacine, décédé dans un zoo de l'île australienne en 1936, ont été retrouvés dans l'armoire d'un petit musée de l'État insulaire, le Tasmanian Museum and Art Gallery.** **M. B.**

RETROUVEZ LA DÉCLARATION

GRAND OCEAN

WWW.GRANDOCEAN-EVENT.COM

LA PREMIÈRE ÉDITION S'EST TENUE
LES 7, 8 ET 9 OCTOBRE 2022
À LA CITÉ DE LA MER, CHERBOURG-EN-COTENTIN
À SAINT-VAAST-LA-HOUGUE

& EN DIGITAL

#GrandOcéan

Partenaires Officiels

Cherbourg en Cotentin · leCotentin · Naval Group

Partenaires Associés

La Manche le département · Région Normandie

Partenaires

La Cité de la mer · edf · Fondation de la mer · OFB · SFA · SNCF Gares

Partenaires Médias

Netflix · Ushuaïa TV · Les Echos Le Parisien Événements · Sciences Avenir La Recherche

Organisé par

Les révélations des égouts du Colisée

Des fouilles dans les sous-sols renseignent sur le déroulement des spectacles antiques.

AP/SIPA

De nombreuses traces de fruits, dont se nourrissait le public pendant les spectacles, ont été mises au jour, ainsi que des ossements d'ours, de félins et… de teckels.

Depuis 1500 ans, les souterrains du Colisée, à Rome (Italie) renferment un important matériel archéologique, témoin de la façon dont se déroulaient les spectacles jusqu'en 523 après J.-C. Fouillés pour la première fois par une équipe italienne d'archéologues, ils ont révélé de nombreuses traces de nourritures (figues, raisins, melons, olives, pêches, cerises, prunes, mûres ou encore noix, noisettes et pignons), preuves que les spectateurs s'accordaient des collations. Mais la trouvaille la plus intrigante est celle d'ossements de teckels parmi ceux d'ours, de lions ou de léopards. Spécialiste des spectacles dans l'Empire romain, María Engracia Muñoz-Santos confesse sa surprise : « *La participation de teckels aux spectacles reste une énigme. Les os sont là, leur présence dans l'arène est donc évidente. Il faut maintenant les étudier pour voir s'ils portent des marques de dents d'autres animaux ou d'armes.* » **M. B.**

SIMONE CONTI

La vitesse de la queue du diplodocus a été établie à 33 m par seconde.

La queue des dinosaures n'était pas supersonique

PALÉONTOLOGIE **Contrairement à ce qu'avaient annoncé des chercheurs il y a sept ans, la queue des grands sauropodes n'aurait pas remué à des vitesses supersoniques. Une équipe américaine a modélisé en 3D la queue d'un diplodocus. Résultat : ils n'auraient été capables de faire battre leur queue qu'à la vitesse de 33 m par seconde. Soit 10 fois moins que la vitesse du son. H. R.**

SOURCE : SIMONE CONTI, ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MILAN, ITALIE.

MOLA/ANDY CHOPPING

Un riche collier du Moyen Âge

ARCHÉOLOGIE
La quantité d'or et la diversité des pendentifs qui le composent, en particulier sa partie centrale à motif de croix cloisonné, font de ce collier une pièce unique pour le haut Moyen Âge en Grande-Bretagne. Il ornait la dépouille d'une femme chrétienne datant du VII[e] siècle, dont la sépulture a été mise au jour dans le village d'Harpole (Angleterre) par une équipe du Musée archéologique de Londres. **S. L.**

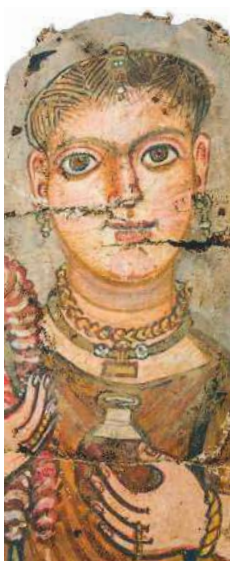
180 kg

Le poids du « véritable wombat géant »

PALÉONTOLOGIE
L'étude du fossile le plus complet de *Ramsayia magna*, le wombat géant qui arpentait l'Australie il y a 81 000 ans, a permis de reconstituer le mode de vie de ce marsupial ancestral et d'établir son poids : près de 200 kg. À comparer aux 15 à 40 kg des wombats actuels. C. B.

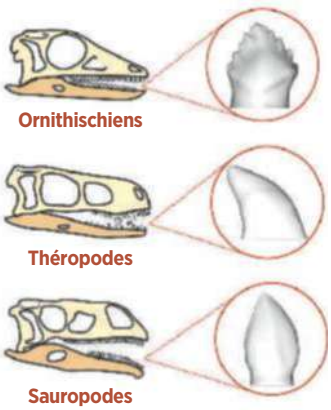
SOURCE : JULIEN LOUYS, UNIVERSITÉ GRIFFITH, AUSTRALIE.

Découverte de nouvelles momies à portrait



EGYPT'S MINISTRY OF TOURISM AND ANTIQUITIES

ÉGYPTOLOGIE
Le ministère des Antiquités égyptien annonce qu'une équipe a mis au jour des momies anciennes inhumées avec des portraits colorés étonnamment réalistes des défunts dans une nécropole de la cité antique de Philadelphie, à une centaine de kilomètres au sud-ouest du Caire (Égypte). Avant cette nouvelle série de fouilles, la découverte la plus récente de tels artefacts à Philadelphie remontait aux années 1880. **H. J.**



ANTONIO BALLELL

Les formes de dents typiques des trois grandes lignées de dinosaures.

Quand les sauropodes mangeaient de la viande

PALÉONTOLOGIE

Les régimes préférentiels des premiers dinosaures ont été révélés par l'étude de la morphologie de leurs dents et des simulations de leur force de morsure. Curieusement, elle indique que les ancêtres des gros herbivores (sauropodes) avaient un régime carné, tandis que les plus petits ornithischiens (ancêtres des dinosaures à armure) étaient omnivores. Une lignée n'a pas changé : les théropodes, dont fait partie le *T. rex*, qui ont toujours eu de l'appétit pour la viande. J. I.

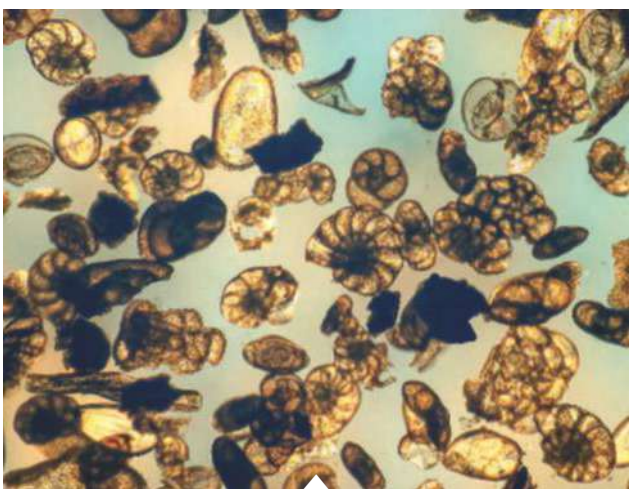
SOURCE : ANTONIO BALLELL, UNIVERSITÉ DE BRISTOL, ROYAUME-UNI.

Forabot, un robot intelligent qui trie les foraminifères

PALÉOCLIMATOLOGIE

Des chercheurs américains ont créé un robot pour faciliter les travaux de recherche sur les foraminifères. Le Forabot est capable d'extraire, d'analyser et de trier ces minuscules fossiles de protistes qui sont des indicateurs clés en biostratigraphie et en paléoclimatologie. Ses concepteurs souhaitant un outil très accessible, le Forabot peut être fabriqué facilement et à moindre coût par les laboratoires. **C. B.**

SOURCE : TURNER RICHMOND, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE CAROLINE DU NORD, ÉTATS-UNIS



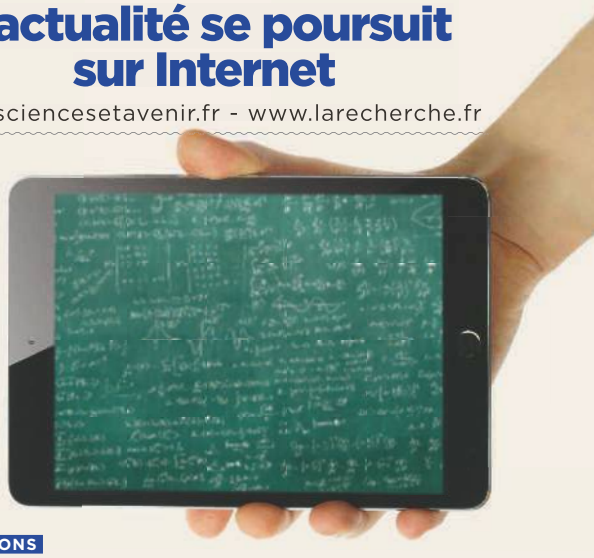
C. GAUTIER/ BIOSPHOTO

Ces fossiles de micro-organismes marins (illustration) recèlent une mine d'informations sur les climats anciens, présents et futurs.

GETTY IMAGES - V. BORRELLI/CNRS - GETTY IMAGES - FOUNDATIONS WORLD ECONOMIC FORUM

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr



ÉQUATIONS

Vers une description mathématique de la réalité

Ne pourrions-nous connaître de la réalité que sa structure mathématique ? Les sciences ne dévoileraient pas les objets qui peuplent le monde, mais seulement les relations qu'ils entretiennent. C'est ce que prônent des adeptes du réalisme structural expliqué par la philosophe Youna Tonnerre. À lire sur le site de La Recherche. https://bit.ly/3vKGFbk

INFORMATION

« Sciences et Avenir » parmi les 10 sites les plus fiables

Sciencesetavenir.fr intègre la liste de fin d'année de NewsGuard qui agrège les sites avec un score maximal de fiabilité et ayant généré le plus de trafic en ligne en 2022. sciav.fr/912top10

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Les plus belles photos du CNRS

Une bibliothèque en os de seiche, un chou dans le cerveau, un crâne en fluorescence... 20 images ont été primées par le CNRS lors du concours La Preuve par l'image. sciav.fr/912diapo

5 minutes

Les 4 clés d'un sommeil réparateur

Une étude de l'université de Californie à Berkeley et du King's College de Londres a établi les quatre paramètres pesant le plus sur notre fatigue au réveil. sciav.fr/912dodo

10 minutes

Les Émirats arabes unis dans la course spatiale

Sciences et Avenir a rencontré Sarah Al Amiri, ministre des Hautes Technologies des Émirats arabes unis et présidente de la jeune agence spatiale du pays. Entretien. sciav.fr/912EAUspace

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

CROISIÈRE POLYNÉSIE

par Voyages d'exception

UNE CROISIÈRE POUR VIVRE DES MOMENTS D'EXCEPTION

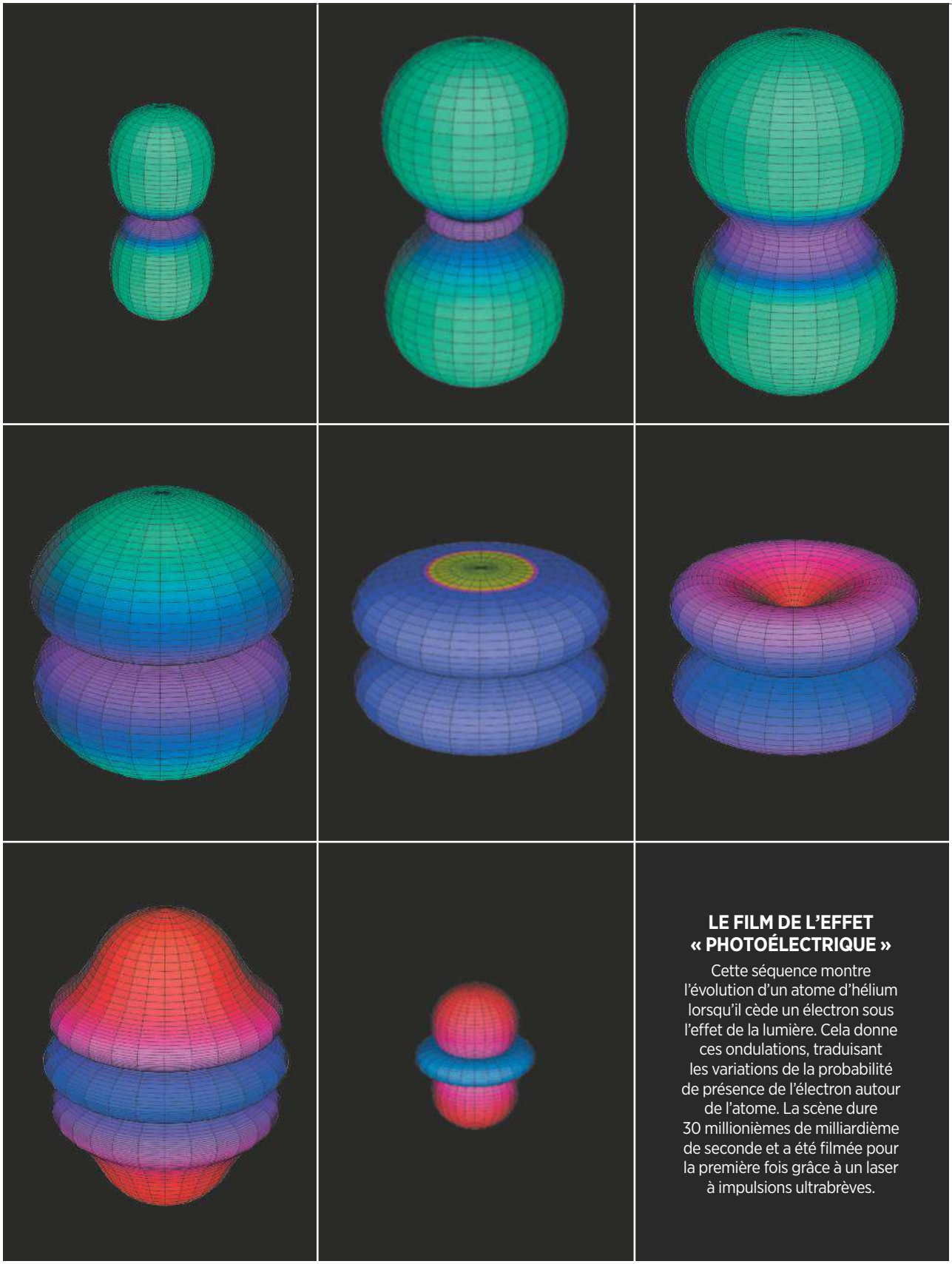
DÉPARTS EN MAI ET EN SEPTEMBRE 2023

Voyages d'exception vous propose de vivre un rêve en découvrant l'un des plus merveilleux archipels du monde : la Polynésie française. À bord du MS Panorama II, un majestueux deux-mâts, vous naviguerez au plus près des joyaux de ces îles et assisterez aux conférences passionnantes de vos guides francophones spécialistes.

DEMANDEZ NOTRE BROCHURE DÉTAILLÉE

au 01 75 77 87 48, par e-mail à contact@voyages-exception.fr,
sur www.voyages-exception.fr/brochures, (code SCPOL à renseigner).

© L'Agence de Presse - Photos : © Shutterstock.



LE FILM DE L'EFFET « PHOTOÉLECTRIQUE »

Cette séquence montre l'évolution d'un atome d'hélium lorsqu'il cède un électron sous l'effet de la lumière. Cela donne ces ondulations, traduisant les variations de la probabilité de présence de l'électron autour de l'atome. La scène dure 30 millionièmes de milliardième de seconde et a été filmée pour la première fois grâce à un laser à impulsions ultrabrèves.

ATTOLAB/CEA PARIS SACLAY – BRUNO BOURGEOIS

Physique ultrarapide
Elle fige le temps

En observant le mouvement des molécules, atomes et électrons durant des intervalles de temps très courts, inférieurs à 10^{-15} seconde, les physiciens décryptent les mécanismes à l'origine des propriétés de la matière. Il en découle une foule d'applications, depuis l'exploration de la physique quantique jusqu'à l'élaboration de nouveaux matériaux.

Par Fabrice Nicot @ fnicot07

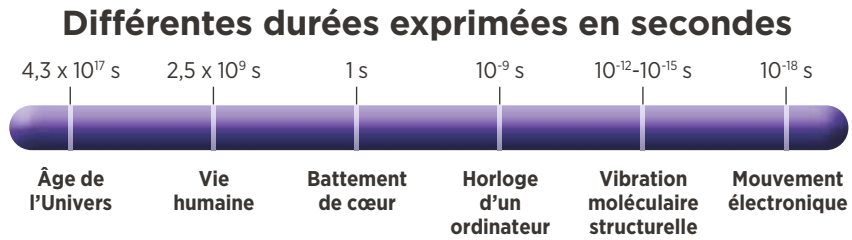
Einstein en aurait rêvé. La physique ultrarapide l'a fait. En mars 2022, le laboratoire AttoLab (CEA-CNRS, université de Paris-Saclay), installé sur le plateau de Saclay dans l'Essonne, a filmé pour la première fois en temps réel la manière dont un électron est arraché à son atome sous l'action de la lumière. C'est l'effet photoélectrique décrit par Albert Einstein en 1905, qui lui valut le prix Nobel seize ans plus tard. Ce phénomène, étudié expérimentalement depuis longtemps, a été vu par les physiciens d'AttoLab et non simplement mesuré. Et en 3D ! L'expérience a fait l'objet d'un article dans la revue *Science Advances*. « *Nous avons excité des atomes d'hélium avec des impulsions ultrabrèves, de l'ordre de l'attoseconde* [10^{-18} seconde], explique Pascal Salières qui dirige le groupe Attophysique à l'origine de l'expérience. *En absorbant des photons, l'hélium est brutalement excité et cède un électron. Il est ionisé. Nous sommes parvenus à enregistrer l'éjection des électrons, et cela dans toutes les directions. D'où l'aspect "3D". Par la même occasion, nous avons démontré que l'éjection n'est pas instantanée. Elle peut se dérouler en quelques femtosecondes* [10^{-15} s] *si l'électron éjecté est d'abord piégé par le noyau avant de s'échapper. Cet aspect était jusqu'ici inconnu.* »

Ce joli résultat illustre le dynamisme d'une discipline en plein essor : la physique ultrarapide. Les premières impulsions laser attoseconde remontent à la fin

des années 1980 avec Anne L'Huillier et son équipe du CEA de Saclay *(lire p. 34)*. Elles étaient alors considérées comme des curiosités de laboratoire, sans applications concrètes. Aujourd'hui, la qualité des sources laser et les applications qui en découlent provoquent une effervescence que raconte Franck Lépine, directeur de recherche CNRS à l'institut Lumière Matière de Lyon. Il coordonne le groupement de recherche Ultrafast Phenomena (GdR UP) (Institut national de physique-CNRS). *« La physique ultrarapide occupe aujourd'hui plus de 900 scientifiques en France, répartis dans plus de 50 laboratoires, rassemblés au sein du GdR UP. Elle attire aussi beaucoup de doctorants, une des preuves de la vitalité de cette communauté. Il faut enfin ajouter une dizaine d'industriels qui travaillent à l'élaboration des sources laser.* » Autre manifestation de ce bouillonnement, le lancement officiel ce mois de février du laboratoire franco-japonais Dynacom, qui se consacrera à la manipulation ultrarapide de matériaux par la lumière. Il regroupe les universités de Rennes, Nantes, Tours, et quatre universités japonaises.

Le stade ultime de la dynamique de la matière

Ralentir le temps jusqu'à presque le figer offre aux physiciens une nouvelle façon d'explorer leur discipline. La matière se met littéralement en mouvement, comme le résume Éric Collet, de l'Institut de physique de Rennes, et codirecteur de Dynacom. *« À l'échelle de la picoseconde* [10^{-12} s], *vous observez l'expansion des cristaux. À l'échelle de la femtoseconde, vous décomposez les mouvements des atomes ou des molécules. Enfin, la résolution attoseconde donne accès aux mouvements des électrons durant les réactions chimiques. C'est le stade ultime de la dynamique de la matière.* » Évidemment, les « films » produits décevront les amateurs de cinéma… Prenez celui de l'effet photoélectrique : difficile à comprendre pour un non-spécialiste ! Pourtant, les acteurs du domaine tiennent à s'inscrire dans la continuité de l'histoire de la photographie, plus exactement des physiologistes Étienne-Jules Marey (1830-1904) et Eadweard Muybridge (1830-1904). Dans les années 1870, ils furent les premiers à utiliser la photographie pour étudier les mouvements des êtres vivants en les décomposant, grâce à des séries de clichés pris en rafale *(voir la séquence ci-dessous)*. L'objectif des physiciens aujourd'hui est le même, mais au lieu de quelques images par seconde, ils en réalisent des milliards de milliards. Et si l'on ne voit pas au sens propre d'électrons gigoter ni d'atomes danser, c'est qu'il faut élargir le concept de cinéma. *« Le cinéma montre des corps et des objets en mouvement,* note Franck Lépine. *Eadweard Muybridge a décrit le galop du cheval à partir de ses positions successives dans l'espace. Mais nous pourrions imaginer un autre film, représentant la température du cheval en fonction du temps, ou bien son souffle, même si dans ce cas, il faudrait d'autres instruments qu'une caméra. De la même façon, nous n'allons pas vraiment mesurer la position d'une particule dans l'espace, car ce concept est purement classique. Alors que nous sommes en physique quantique, où une particule occupe plusieurs positions en même temps, ce qui se traduit par une densité de probabilité plutôt qu'une position bien définie.* »



Toute une panoplie de lasers à la disposition des chercheurs

« Quantique », le mot est lâché : voilà pourquoi les films des chercheurs sont si particuliers. Ce qu'ils veulent enregistrer, c'est la fonction d'onde associée à la particule. Un concept mathématique qui ne doit pas effrayer. Il faut retenir que cette fonction possède deux composantes : une amplitude, qui correspond à la probabilité de présence de la particule, et une phase. Cette dernière caractéristique est plus délicate à expliquer, mais disons qu'elle confère aux particules

La physique ultrarapide s'inscrit dans l'histoire de la chronophotographie qui décompose le mouvement grâce à une série de clichés. Ici, le cheval au galop pris par le photographe britannique Eadweard Muybridge en 1878.

AKG IMAGES

INSTRUMENT DE POINTE

AttoLab, un studio de cinéma « attoseconde »

Inaugurée en 2017 sur le plateau de Saclay (Essonne), AttoLab est une plateforme laser spécialisée dans l'étude et le contrôle de la matière à l'échelle de l'attoseconde. Elle occupe une surface totale de 600 m² au-dessus de l'ancien accélérateur linéaire de particules, construit dans les années 1950 et démantelé dans les années 2000. « *Il était bâti sur une épaisse dalle de béton que nous avons réutilisée afin de bénéficier d'une grande stabilité dynamique,* explique Pascal Salières, coordinateur d'AttoLab. *En une attoseconde, la lumière ne parcourt que 0,3 nanomètre (nm), cela donne une idée de la précision dont nous avons besoin.* » Un laser titane-saphir de 800 nm produit dans un premier temps des impulsions de 25 femtosecondes très intenses. C'est nécessaire pour ensuite générer des impulsions d'environ 100 attosecondes, lorsque le faisceau interagit avec un gaz. La source attoseconde est ensuite disponible pour des expériences (en fait, trois sources attoseconde aux caractéristiques complémentaires constituent l'infrastructure). « *L'originalité de cette plateforme est d'avoir été conçue par une collaboration entre des spécialistes des sources attoseconde et les utilisateurs, spécialistes de la dynamique ultrarapide en phases liquide, solide ou gazeuse. Les performances des sources sont ainsi parfaitement adaptées aux différentes applications qui utilisent successivement le temps de faisceau.* »

P.STROPPA/CEA

Les installations laser permettent aux chercheurs d'étudier la dynamique ultrarapide de la matière sous toutes ses formes.

leur caractère quantique, en leur permettant notamment d'interférer, telles des vagues à la surface d'un plan d'eau. Lorsque les chercheurs connaissent l'amplitude et la phase de la fonction d'onde d'une particule, ils savent tout d'elle. « *La physique ultrarapide permet de voir évoluer ces deux grandeurs. Finalement, les films ne montrent pas autre chose…* », conclut Franck Lépine.

Pour faire cela, il faut bien sûr autre chose qu'un appareil photo. « *Dans le cas de l'étude de l'effet photoélectrique, nous utilisons un laser attoseconde selon la technique "pompe-sonde",* reprend Pascal Salières. *Une première impulsion donne en quelque sorte le top départ de l'observation en excitant l'atome. Une seconde impulsion enregistre l'évolution de la fonction d'onde de l'électron. De très nombreuses mesures sont nécessaires pour obtenir toutes les images du film de l'effet photoélectrique. Mais les atomes isolés se comportant tous exactement de la même façon, une caractéristique propre au monde quantique, recommencer n'est pas un problème. Cela nous permet d'accumuler les données et de réaliser le film le plus précis possible.* »

Tout comme il existe plusieurs types de caméras, les physiciens disposent de tout une panoplie de lasers selon ce qu'ils souhaitent observer : molécules complexes ou simples atomes, en phase gazeuse ou bien solide… Les X-FEL (lasers à électrons libres) sont

CEA

AVIS D'EXPERTE

ANNE L'HUILLIER
PHYSICIENNE ATOMIQUE À L'UNIVERSITÉ DE LUND (SUÈDE) *

« L'exploration des propriétés quantiques de la matière est à notre portée »

Vous êtes une des pionnières de la physique attoseconde, apparue à la fin des années 1980. Où en est cette physique ?
Il y a une trentaine d'années, j'avais assisté à une conférence sur la physique femtoseconde où j'avais eu l'impression d'un foisonnement très stimulant, avec des applications dans de nombreux domaines. Aujourd'hui, j'ai la même sensation avec la physique attoseconde. Il y a une évolution des techniques et des sources qui fait que le domaine est en train de s'ouvrir vers des applications dans bien des domaines, depuis la biologie jusqu'à l'industrie des semi-conducteurs en passant par la physique fondamentale.

Quels sont les progrès majeurs récents réalisés dans ce domaine ?
Les sources attoseconde sont maintenant plus stables, à haute cadence de répétition, plus flexibles, permettant d'atteindre des régions d'énergie de plus en plus étendues. Les techniques permettant d'effectuer des mesures temporelles à l'échelle attoseconde sont également bien meilleures, avec des détecteurs, par exemple d'électrons, de plus en plus fiables et complets. La théorie a aussi beaucoup progressé. Auparavant, nous disposions d'une description théorique des sources laser assez approximatives. Nous sommes désormais beaucoup plus quantitatifs. Nous pouvons par exemple prévoir précisément le nombre de photons émis par la source, leur fréquence, et c'est très important pour certaines applications, et vérifier que nos techniques de mesure sont solides.

Quelles applications vous paraissent particulièrement prometteuses ?
Les applications concernent majoritairement les systèmes complexes, à savoir les molécules et la matière à l'état solide. Il s'agit de comprendre le couplage entre le mouvement des électrons et celui des noyaux par exemple. Mais ce que je trouve le plus passionnant, c'est l'exploration des propriétés quantiques de la matière, comme l'intrication. Alors nous développons des techniques pour mesurer ces états quantiques. C'est tout nouveau. Je ne sais pas où ça va. Mais nos mesures sont de plus en plus raffinées, complexes. Nous pouvons espérer que le rêve devienne réalité. ■

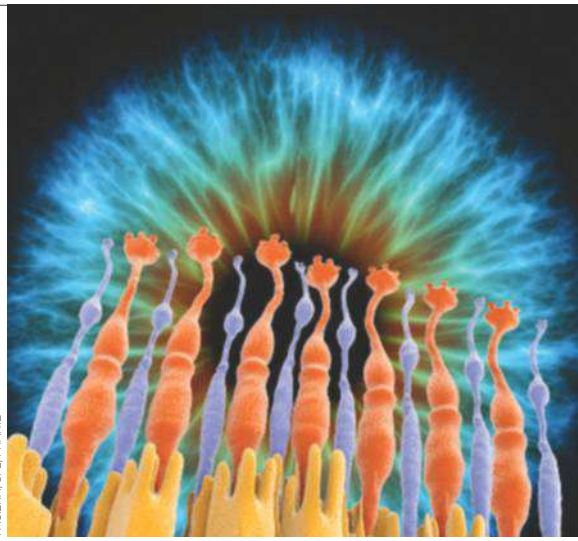
Propos recueillis par F. N.

* Prix Wolf 2022 pour ses travaux dans le domaine de la physique attoseconde.

▸ de très grandes installations mesurant jusqu'à 3 kilomètres de long installées à Stanford (États-Unis), à Hambourg (Allemagne) ou encore à Villigen (Suisse), qui génèrent des impulsions laser intenses dans le domaine des rayons X. À l'opposé, les sources de laboratoire tiennent sur une table de quelques mètres. Elles reposent sur des lasers femtoseconde très puissants, dans le domaine visible et le proche infrarouge. Ils ont été mis au point dans les années 1980 par Gérard Mourou et Donna Strickland (tous deux prix Nobel de physique en 2018). En plus de sonder la matière à 10^{-15} seconde près, ils sont utilisés en médecine pour la chirurgie de l'œil, ou bien dans l'industrie pour des découpes très propres.

Des progrès spectaculaires en biologie ont pu être réalisés

C'est à partir de ces lasers femtoseconde que l'on a pu passer à l'attoseconde, en jouant sur la « génération d'harmoniques », un procédé découvert par Anne L'Huillier et son équipe de Saclay en 1987. Pascal Salières, qui fut son étudiant en thèse, détaille le mécanisme qui n'a été compris qu'en 1993. *« Le laser intense femtoseconde est focalisé dans un jet de gaz, où il interagit avec des atomes. Il arrache une fraction du nuage électronique et l'accélère. Certaines trajectoires électroniques retournent vers le noyau. Lors de la collision avec celui-ci, l'électron libère l'énergie acquise lors de l'accélération laser sous la forme d'un flash attoseconde très court et très énergétique* [voir l'infographie ci-contre]. *L'énergie correspondante est un multiple exact de l'énergie initiale du photon laser (éventuellement des centaines de fois), d'où le terme d'harmoniques.* » Aujourd'hui, la France compte quatre installations attoseconde, Celia (Bordeaux), ILM (Lyon), LOA (Palaiseau) et donc AttoLab.
Les premiers travaux issus des lasers femtoseconde dans les années 1990 portaient sur l'étude des réactions chimiques en phase gazeuse ou en solution. Ils ont été amorcés par le chimiste égyptien Ahmed Zewail (1946-2016). Il a démontré com-



PASIEKA/SPL/PHANIE

APPLICATION

Le fonctionnement de la vision

La physique femtoseconde a permis de décortiquer au plus près les mécanismes de la vision. La rétine de l'œil est tapissée de cellules spécialisées, des cônes *(illustration ci-contre)*, sensibles à trois couleurs : le jaune, le bleu et le rouge. Lorsque les photons arrivent, ils sont absorbés par des protéines dites photo-actives. Sous l'effet de l'excitation lumineuse, la géométrie de la protéine change, une partie de sa structure pivote, passant d'une forme dite cis à une forme dite trans. Ce changement modifie son potentiel électrique, et génère *in fine* un signal électrique qui remonte au cerveau.
Le changement de configuration des protéines, qui se déroule en quelques centaines de femtosecondes, a pu être observé à l'aide de lasers d'abord dans le visible puis dans le domaine des rayons X.

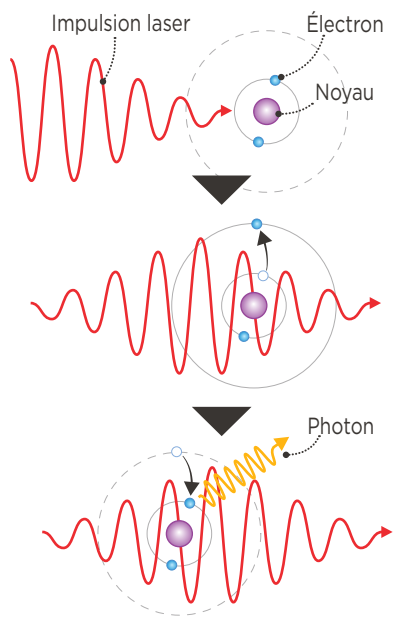
ment utiliser les impulsions ultrabrèves afin d'étudier des réactions chimiques en observant la dynamique des liaisons entre atomes. Ces travaux lui ont valu le prix Nobel de chimie en 1999. Ils ont débouché sur de nombreuses applications en chimie et pharmacologie, avec la possibilité d'améliorer le rendement de certaines réactions chimiques. À partir des années 2000 et 2010, voir des molécules complexes vibrer et se déformer a permis des progrès spectaculaires en biologie, notamment pour la compréhension des mécanismes de la vision *(lire l'encadré ci-dessus)*.

Contrôler les propriétés des matériaux

Après l'observation est venu le temps du contrôle. « *Ce nouvel aspect de la physique ultrarapide est en plein développement,* commente Éric Collet. *Il s'agit d'utiliser la lumière laser dont nous disposons (térahertz, infrarouge, visible, ultraviolet, X) pour contrôler les propriétés de matériaux. Transformer un conducteur électrique en un isolant par exemple. Ou bien rendre un matériau magnétique juste en l'éclairant.* » Parmi les applications qui pourraient en découler, l'équipe d'Éric Collet au sein de l'Institut de physique de Rennes travaille à la mise au point de mémoires magnétiques moléculaires, contrôlées par la lumière, avec des opérations 1000 fois plus rapides que celles des processus actuels. À condition de les rendre plus sobres. « *L'utilisation de lumière basse énergie comme le térahertz ou l'infrarouge permet d'envisager des processus moins énergivores,* explique Éric Collet. *En effet, la lumière visible utilisée actuellement chauffe les dispositifs, c'est de l'énergie perdue.* » Pour l'instant, cette technologie n'est pas encore sortie des laboratoires.

BRUNO BOURGEOIS

Le mécanisme de l'attoseconde



Excité par un laser femtoseconde, un atome réémet une impulsion lumineuse (photon) très brève et très énergétique lors du changement d'orbitale de l'électron.

Désormais, les sources attoseconde parvenues à maturité ouvrent aux chercheurs un nouveau champ d'exploration fascinant : la physique quantique dans ses manifestations les plus étranges. Comme l'intrication. Des particules intriquées restent liées quelle que soit la distance qui les sépare. Comment étudier ce phénomène en temps réel, voire le contrôler ? L'idée consisterait à repartir de l'effet photoélectrique, explique Pascal Salières : « *Lorsque l'électron est arraché à l'atome [devenu un ion], il reste lié à ce dernier par l'intrication. Malgré la distance, la paire électron-ion est un système intriqué, elle est décrite par la même fonction d'onde. Utilisons un deuxième couple électron-ion, mais où l'électron arraché possède une énergie différente car provenant d'une couche plus profonde de l'atome. En jouant avec la durée des impulsions attoseconde, nous pourrions distribuer l'énergie au niveau de chaque électron de telle sorte qu'ils passent d'un état intriqué, où ils sont chacun attachés à leur ion, à un état désintriqué, où ils ne le sont plus car ils deviennent indiscernables. Autrement dit, nous pourrions construire ou détruire une intrication, et observer en combien de temps cela se fait. Ce serait fascinant.* » En guise de plongée au cœur de la physique, difficile de faire plus vertigineux que de filmer en direct le monde quantique… ■

Les promesses de la sismologie planétaire

Utilisé avec succès sur Mars, le sismomètre SEIS a dévoilé des informations inédites sur la structure interne de la planète. De quoi motiver la mise au point de nouveaux instruments pour explorer les profondeurs d'astres comme la Lune ou Titan, satellite de Saturne.

Clap de fin pour la mission InSight de la Nasa. Le 21 décembre dernier, l'agence spatiale américaine a annoncé que cette plateforme scientifique qui a atterri sur Mars en 2018 n'avait plus assez d'énergie pour faire fonctionner son ordinateur de bord et transmettre des données. La faute aux très fines poussières qui parsèment le sol de la planète, virevoltent dans l'atmosphère et se sont peu à peu accumulées sur les panneaux solaires de l'atterrisseur. InSight laissera toutefois un formidable héritage grâce à l'instrument phare de la mission : un sismomètre nommé SEIS (Seismic Experiment for Interior Structure), développé en France par l'Institut de physique du globe du Paris (IPGP) et le Centre national d'études spatiales (Cnes). Il aura détecté en effet une multitude de séismes, causés par l'activité géologique de notre voisine et par des météorites s'écrasant sur son sol *(lire p. 38)*. Une première sur une autre planète que la Terre. Or *« l'analyse de ces tressaillements a permis de dévoiler des informations inédites sur la structure et la température profondes de Mars, de la croûte jusqu'au noyau »*, se félicite Philippe Lognonné, géophysicien à l'IPGP et responsable scientifique de SEIS, auquel il se consacre depuis près de trente ans. La relève est par ailleurs assurée. Car les succès d'InSight ont donné un formidable élan à la sismologie planétaire, *« domaine en pleine effervescence qui s'apprête à connaître un âge d'or »*, estime Taichi Kawamura, lui aussi chercheur à l'IPGP. Une panoplie d'instruments est ainsi développée pour découvrir ce qui se cache dans les profondeurs de nombreux astres du Système solaire, depuis la Lune jusqu'aux lointains satellites de Saturne et de Jupiter.

L'étude des vibrations sismiques présente un intérêt majeur en géologie. Lors d'un séisme, l'énergie libérée engendre en effet différents types d'ondes se propageant à la vitesse de plusieurs kilomètres par seconde *(voir l'infographie ci-contre)*. Les ondes de surface sont guidées spécifiquement par le sol et dévastent sur Terre les zones habitées. Les ondes de volume voyagent, en revanche, dans toutes les directions

TAICHI KAWAMURA

« C'est un domaine en pleine effervescence qui s'apprête à connaître un âge d'or »

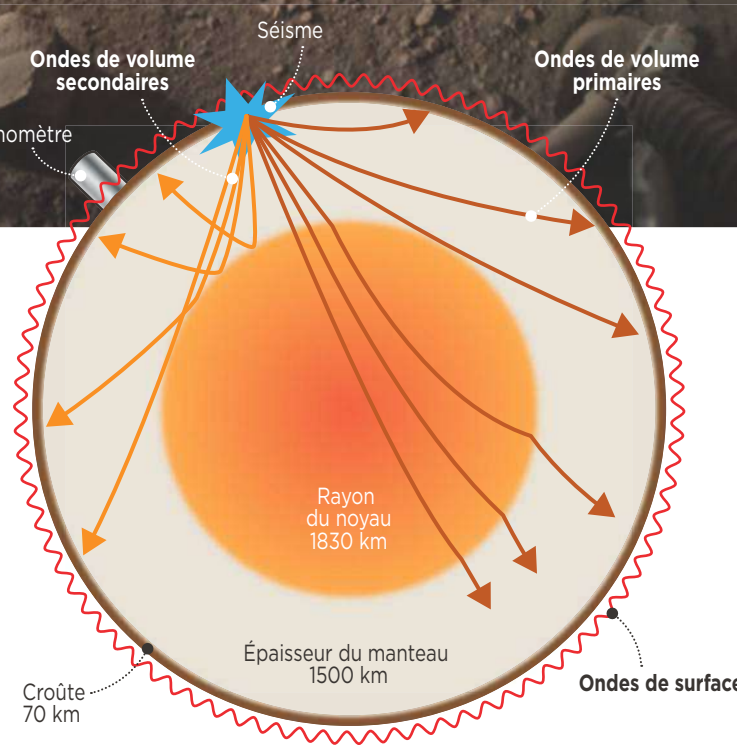
Taichi Kawamura, chercheur à l'Institut de physique du globe de Paris

Le sismomètre SEIS a été conçu par une équipe française (ici photographié en février 2019, sur le sol martien).

NASA/JPL-CALTECH

de l'espace et donc à l'intérieur d'un globe planétaire. Elles se divisent elles-mêmes en deux catégories : les ondes primaires, qui sont les plus rapides et traversent n'importe quel matériau rocheux, solide ou en fusion, avec une vitesse d'autant plus importante que celui-ci est dense et froid ; et les ondes secondaires, moins véloces, stoppées et réfléchies par les fluides. En analysant comment les discontinuités géologiques modifient la vitesse, la trajectoire ou l'amplitude des vibrations sismiques, on peut examiner ainsi les entrailles d'une planète — un peu comme une échographie. C'est de cette façon que les géophysiciens ont découvert, au tournant du XX^e siècle, que la Terre était composée d'une graine solide entourée d'un noyau en fusion, d'un manteau vis-

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : IPGP



La structure interne de Mars a pu être dévoilée grâce à l'analyse des ondes sismiques : les ondes de surface (en rouge), qui suivent le sol, et les ondes de volume — primaires (en marron) et secondaires (en orange) —, qui se propagent à l'intérieur du globe planétaire.

GÉOLOGIE

Les impacts météoritiques, de précieux alliés

Les scientifiques qui étudient la planète Rouge ont reçu il y a un peu plus d'un an un fabuleux « cadeau de Noël ». Le 24 décembre 2021, une météorite de plusieurs centaines de tonnes s'est écrasée en effet dans l'hémisphère nord martien à 35° de latitude, libérant une énergie équivalente à une petite bombe nucléaire et déclenchant un séisme d'une magnitude supérieure à 4. Détecté en premier lieu par le sismomètre de la mission InSight, l'impact a ensuite pu être visualisé, depuis l'espace, par la sonde Mars Reconnaissance Orbiter. Il a éjecté des débris à des dizaines de kilomètres à la ronde, a détaillé la Nasa en octobre 2022. Et creusé un trou de 150 mètres de large pour 20 mètres de profondeur… ce qui en fait le plus gros cratère d'impact détecté ces derniers siècles dans le Système solaire ! Il surpasse ainsi, sur Terre, le cratère Wabar, en Arabie saoudite, qui mesure 120 mètres de diamètre et résulte d'une météorite tombée au début du XIXe siècle. « *Nous ne nous attentions pas à déceler une collision aussi rarissime et avons sans doute eu beaucoup de chance,* témoigne le géophysicien Philippe Lognonné, « père » du sismomètre. *Et cet événement, parfaitement localisé, sera très utile pour caractériser plus finement la croûte martienne.* »

NASA

La mission Dragonfly s'envolera en 2027 pour Titan, la plus grosse lune de Saturne, pour y faire atterrir un hélicoptère autonome équipé de capteurs sismiques (vue d'artiste).

queux et d'une fine croûte rocailleuse. « *Seule la sismologie peut donner accès à ce type d'informations* », insiste Philippe Lognonné. D'où l'idée d'exploiter cette technique sur d'autres corps que la Terre, « *pour comprendre ce qu'ils renferment et comment ils ont pu se constituer* », note Naomi Murdoch, chercheuse à l'Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace à Toulouse. Et de fait, lorsque l'exploration planétaire a pris son essor dans les années 1960, l'utilisation de sismomètres a été très vite envisagée. « *Ils ont fait partie des tout premiers instruments embarqués sur la Lune* », rappelle la planétologue.

10 000 « tremblements de Lune » ont été enregistrés

Lors de la mission Apollo 11 en 1969, l'astronaute américain Buzz Aldrin y déposa ainsi un sismomètre d'une dizaine de kilogrammes. Victime d'une surchauffe, l'engin ne fonctionna qu'une vingtaine de jours. Mais d'autres engins, plus résistants, seront installés lors des missions Apollo 12, 14, 15 et 16. Pas moins de 10 000 « tremblements de Lune » pourront ainsi être enregistrés, certes de faible magnitude (inférieure à 2 sur l'échelle de Richter). Des secousses seront même provoquées artificiellement : en faisant s'écraser le dernier étage des fusées Saturne V en particulier, afin de connaître très précisément la source du séisme et glaner un maximum d'informations. « *Ces données ont permis de comprendre que la Lune n'était pas morte géologiquement et était, tout comme la Terre, un astre différencié* », indique Naomi Murdoch. Elle recèle une graine interne enveloppée d'un noyau liquide, un manteau ainsi qu'une croûte trois fois plus épaisse que celle de notre planète.

Forte de ces succès, la Nasa incorpora des « stéthoscopes planétaires » sur chacune des deux sondes Viking, les premières à réussir un atterrissage sur Mars en 1976. Le sismomètre de Viking 1 ne put, hélas, se déverrouiller, restant à jamais inactif. Et celui de Viking 2 enregistra des signaux inexploitables. « *Installé sur le pont de l'atterrisseur et non sur le sol, il était trop exposé aux vents. Car Mars possède une atmosphère, contrairement à la Lune* », relève Taichi Kawamura. En 1982, les missions soviétiques Venera 13 et 14 embarquèrent elles aussi des sismomètres lorsqu'elles se posèrent sur Vénus. Mais les instruments ne survécurent que quelques heures sur la surface, où la pression atteint 90 bars et la température 460 °C.

Les trois décennies suivantes ressembleront « *à une longue traversée du désert* », souffle Philippe Lognonné. Faite d'échecs — comme avec la mission russe Mars 1996, munie d'un sismomètre conçu par l'IPGP mais qui n'est pas jamais parvenue à quitter l'orbite terrestre — ou de propositions rejetées par les agences spatiales. « *Après*

Apollo, la Lune n'avait plus les faveurs des politiques publiques. Et pour ce qui concerne Mars, ce n'était pas la géophysique mais l'exobiologie et la recherche de vie extraterrestre qui étaient privilégiées », constate l'expert.

Mais la situation se débloque en 2012. La Nasa accepte de financer InSight, qui comporte une station météorologique complète (baromètre, anémomètre…) et, bien sûr, le sismomètre français. Celui-ci est d'une sensibilité incroyable. Ses pendules peuvent détecter d'infimes vibrations de 5 millièmes de milliardième de mètre… soit le vingtième du diamètre d'un atome d'hydrogène ! Et contrairement aux capteurs des sondes Viking, il devait être positionné sur le sol à l'aide d'un bras robotisé, puis recouvert d'un bouclier le protégeant des vents. Résultat : plus de 1300 secousses détectées depuis l'atterrissage sur Mars et la mise en service de la machine début 2019. Les plus grosses — dont un séisme de magnitude 4,7 enregistré en mai 2022 — ont permis d'« éclairer » ainsi l'intérieur de notre voisine. Elle possède une croûte très stratifiée de 20 à 70 km d'épaisseur, riche en éléments radioactifs et altérée notamment par d'anciennes circulations d'eau dans les 10 premiers kilomètres, qui coiffe un manteau peu épais puis un énorme noyau liquide de 1830 km de rayon. Soit quasiment la moitié de la planète, beaucoup plus gros que ce que les scientifiques imaginaient.

« *Cette mission constitue un tournant. Elle a permis d'acquérir une formidable expérience et montre que les sismomètres planétaires ont atteint une très haute maturité technologique* », lâche Taichi Kawamura. « *Un tabou est levé,* renchérit Philippe Lognonné. *Quand la sismologie apparaît importante dans les objectifs des missions d'exploration spatiale, elle est désormais aussitôt intégrée.* » Comme celles, de plus en plus nombreuses ces dernières années, qui visent à nouveau la Lune. En 2025, le programme CLPS (Commercial Lunar Payload Services) de la Nasa déposera ainsi une série d'instruments sur la face cachée de l'astre sélène. Parmi eux : un capteur issu d'un des modèles de rechange de SEIS, mais trois fois plus sensible que son grand frère martien. « *Les mesures seront donc à la fois très précises et totalement nouvelles, puisque les capteurs d'Apollo étaient tous positionnés sur la face visible* », trépigne Philippe Lognonné, qui supervisera l'expérience. Objectifs : sonder l'interface entre le manteau et le noyau lunaires ; et comprendre pourquoi les faces visible et cachée apparaissent si différentes, la première lisse et parsemée de laves solidifiées, la seconde couverte de hautes montagnes et constellée de cratères.

L'année suivante, la mission chinoise Chang'e7 déploiera également un sismomètre sur la Lune : mais cette fois au pôle sud, une autre première. De telles machines pourraient même être disposées par les astronautes du programme américain Artemis, qui devraient fouler le pôle sud lunaire en 2026 ou 2027. « *Nous développons avec le Cnes un nouveau sismomètre encore plus sensible et espérons le proposer aux futurs appels d'offres de ces missions historiques* », confie Philippe Lognonné. L'ensemble de ces sondes, surtout si elles fonctionnent en réseau, révéleront alors de nouvelles informations sur l'intimité de la Lune, mais aussi sur le risque sismique au niveau du pôle sud : « *Une donnée essentielle pour y bâtir d'éventuelles bases habitées dans les années 2030* », signale Taichi Kawamura.

AFP

« Nous développons avec le Cnes un nouveau sismomètre encore plus sensible afin de le proposer à de futures missions »

Philippe Lognonné, géophysicien à l'Institut de physique du globe de Paris, et responsable scientifique de l'instrument SEIS

Des relevés sismiques sur Titan pour dévoiler son sous-sol

En 2027, la mission Dragonfly de la Nasa s'envolera pour sa part vers Titan : plus gros satellite naturel de Saturne et seul autre corps du Système solaire à posséder des lacs et des mers en surface, même si ceux-ci ne sont pas constitués d'eau mais d'hydrocarbures. Après plusieurs années de voyage, elle y fera atterrir un hélicoptère autonome doté de huit rotors. Cette « libellule » de 450 kg se déplacera alors dans l'atmosphère épaisse de Titan pour explorer différents milieux (dunes, cratères, lacs…), analyser des échantillons et chercher d'éventuelles traces de vie, ainsi que pour réaliser des relevés sismiques grâce à un appareil conçu par la Jaxa, l'agence spatiale japonaise.

Les sismogrammes permettront de déterminer « *l'épaisseur des dépôts de molécules organiques* », explique Taichi Kawamura, qui participe à cette fascinante mission. Mais ils révéleront ce qui se trouve également à des dizaines de kilomètres au-dessous. Car des signaux radio captés dans les années 2000 par la sonde Cassini suggèrent la présence d'un océan d'eau liquide sous la surface gelée de Titan. « *Nous pourrons confirmer son existence, connaître sa profondeur… et même savoir s'il est en contact avec des roches silicatées — un environnement qui pourrait alimenter une chimie prébiotique* », s'enflamme le géophysicien. Sans compter les capteurs actuellement à l'étude pour ausculter l'intérieur d'Encelade, autre lune de Saturne, et Europe, satellite de Jupiter, qui abriteraient eux aussi des océans subglaciaires. Dans les années à venir, la sismologie sera ainsi d'une aide inestimable pour percer les secrets de ces mondes souterrains. ■

Franck Daninos @fdaninos

Climat

Inverser le cours du réchauffement

La Terre étouffe et sera bientôt invivable si le réchauffement n'est pas stoppé. Beaucoup de scientifiques estiment que nous avons les moyens non seulement de limiter le changement climatique, mais aussi de refroidir le monde. Les solutions proposées, nombreuses et variées, sont à découvrir dans ce dossier spécial.

Dossier réalisé par
Loïc Chauveau et Rachel Mulot

ALESSANDRO GANDOLFI / PARALLELOZERO

SOMMAIRE

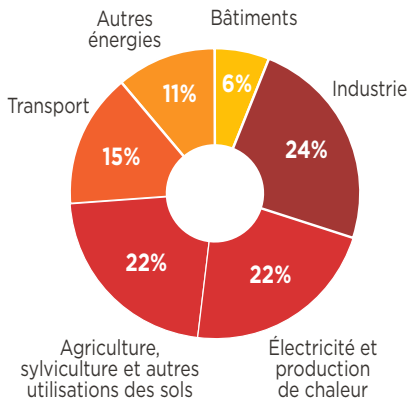
CONSTAT La menace d'une « Terre étuve » p. 42 **SOLUTIONS** Le défi d'un refroidissement climatique p. 46
Énergie Le grand bond en avant du renouvelable p. 48 **Capture de CO_2** Piéger les gaz à effet de serre p. 51
Ville Un écosystème citadin à développer p. 53 **Transports** En chemin vers la mobilité verte p. 55 **Agriculture** Les bonnes pratiques se font attendre p. 57 **Alimentation** Mieux manger améliore l'environnement p. 58 **Matériaux** Une matière première à valoriser p. 61

La menace d'une « Terre étuve »

Le réchauffement a déjà dépassé 1,1 °C. Or, si la Terre se réchauffe de plus de 1,5 °C par rapport à l'ère industrielle, cela entraînera un effet domino, aggravant les conséquences du changement climatique et transformant la planète en étuve. Une situation difficilement vivable.

Que se passera-t-il si nous acceptons notre sort climatique ? L'été 2022 donne un aperçu de la réponse. En proie aux feux de forêt, à des terres agricoles assoiffées et à des canicules, les citoyens européens ont été invités à s'adapter, à faire preuve de résilience et à fournir des efforts individuels. Avec le réchauffement en cours, estimé entre +1,1 °C et +1,2 °C, depuis l'ère préindustrielle, les sécheresses sévères et les phénomènes météo extrêmes deviennent en effet plus fréquents, comme le prévoyait le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Giec) il y a des années. À l'automne, avant même la COP27, une résignation doublée de colère s'est emparée de certains scientifiques : les émissions de gaz à effet de serre étant toujours trop importantes, selon le Global Carbon Project, et les actions politiques ou celles des grands secteurs polluants *(voir l'infographie ci-contre)* toujours trop timorées, jamais les humains ne seraient collectivement capables de limiter la hausse de température depuis l'ère préindustrielle en deçà de 2 °C et encore moins à 1,5 °C, objectifs de l'accord de Paris de 2015… Mais comment cela se traduirait-il exactement dans nos vies et pour la planète ? À quoi nous exposons-nous ? À un véritable emballement hydrique et thermique aux conséquences économiques et sociales désastreuses, s'inquiète l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), qui a produit le 2 décembre 2022 un rapport claquant comme un avertissement. À la suite de dizaines d'études scientifiques et économiques, elle *« appelle les gouvernements à prendre des mesures urgentes pour lutter contre les risques de points de basculement du système climatique »*, dont la probabilité de survenir était jusqu'à présent estimée faible, et négligée — à tort — dans la prise de décision en matière de politique.

Les émissions mondiales de gaz à effet de serre



BRUNO BOURGEOIS / SOURCE : GIEC 2022

Un « point de basculement » est un seuil critique au-delà duquel un système se réorganise, souvent de manière abrupte ou irréversible. Ses principaux éléments à surveiller — des composantes du système terrestre qui rompraient son équilibre — comprennent l'effondrement des calottes glaciaires de l'Antarctique occidental et du Groenland, la fonte du pergélisol arctique, émettrice de méthane, la débâcle des courants profonds de l'Atlantique qui participent au rafraîchissement de la Terre ou encore le dépérissement de la forêt amazonienne, synonyme d'épuisement de puits de carbone et de feux polluant toute l'atmosphère. Or *« les dernières recherches montrent que ces*

JOHAN ROCKSTRÖM

« Passer le seuil de 2 °C entraînerait inévitablement et rapidement une température de 4 à 5 °C plus élevée qu'à la période préindustrielle »

Johan Rockström, directeur du Centre pour la résilience de Stockholm (Suède)

16 points de basculement à surveiller

Si les températures continuent d'augmenter, 16 points de basculement identifiés par les scientifiques pourraient modifier en profondeur les grands systèmes régulant la Terre. Certains sont déjà atteints, avec des impacts locaux, régionaux ou mondiaux. Inventaire non exhaustif de ces effets qui amplifieront le changement climatique en cours.

1 Fonte du pergélisol dans le Grand Nord
>> Émissions de méthane, déstabilisation des infrastructures.

2 Mort massive du corail tropical
>> Perte de biodiversité, fragilisation des côtes.

3 Fonte de la plateforme glaciaire de l'Antarctique ouest
>> Montée des eaux.

4 Fonte de la calotte glaciaire au Groenland
>> Montée des eaux. Afflux d'eau douce déstabilisateur pour les courants de surface et profonds de l'océan. Assèchement généralisé à travers l'Europe et l'Asie. Augmentation des précipitations en Amérique du Nord.

5 Ralentissement de la convection océanique en mer du Labrador
>> Refroidissement dans l'Atlantique.

6 Fonte de la banquise de la mer de Barents
>> Amplification du réchauffement par perte de l'effet d'albédo. Augmentation de l'acidification des océans.

7 Fonte des glaciers alpins
>> Pertes locales d'importantes réserves d'eau, réaffectation des terres, pertes de rendements agricoles.

8 Perturbation de la circulation océanique profonde de l'Atlantique
>> Dérégulation des systèmes de rafraîchissement et de réchauffement, baisse des précipitations, surtout en Afrique de l'Ouest. Perturbation de la mousson africaine, affaiblissement de la mousson d'été indienne.

9 Débâcle de la forêt boréale au sud
>> Feux et changement de ravageurs. Diminution des températures hivernales locales et des précipitations régionales. Dégel accru du pergélisol.

10 Expansion de la forêt boréale au nord
>> Diminution de l'effet d'albédo.

11 Déplacement des moussons sahélienne et ouest-africaine
>> Pluies diluviennes accrues, personnes déplacées.

12 Fonte des bassins/lacs sous-glaciaires de l'Antarctique est
>> Hausse du niveau de la mer

13 Dépérissement de la forêt amazonienne
>> Sécheresses fréquentes. Baisse de CO_2 absorbé. Perte de biodiversité.

14 Effondrement du pergélisol boréal
>> Réchauffement local, bouleversement des écosystèmes. Effondrement des infrastructures. Libération de maladies infectieuses (anthrax) et de méthane.

15 Fonte de la banquise d'hiver en Arctique
16 Fonte de la calotte glaciaire de l'Antarctique est
>> Amplification du réchauffement par perte d'albédo. Acidification des océans. Perte d'habitats de reproduction et d'alimentation menaçant la survie des animaux qui dépendent de la banquise.

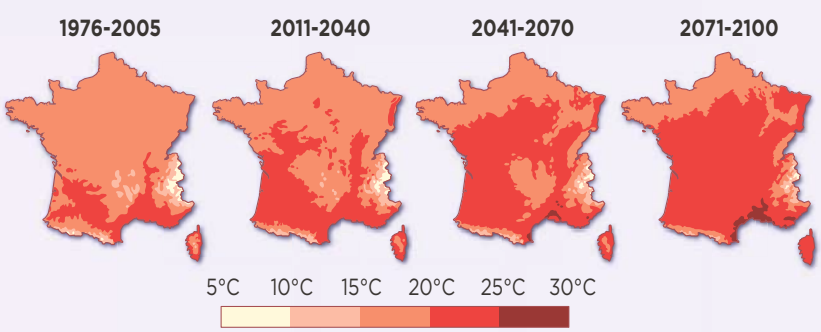
BRUNO BOURGEOIS, SOURCE : TIM LENTON, GIEC ET OCDE

PROSPECTIVE

La France, dans un monde réchauffé de 2,6 °C

Sauf à changer de stratégie, le monde se dirige vers un réchauffement compris entre +2,4 °C et +2,8 °C d'ici à 2100, selon le Programme des Nations unies pour l'environnement. En France, pour un réchauffement planétaire de 2,6 °C, les températures moyennes augmenteraient entre 3,3 et 3,7 °C. Cela correspond à un doublement du réchauffement déjà constaté en France (1,7 °C supplémentaire depuis 1900). Les paysages en seraient totalement bouleversés, les agriculteurs changeraient d'espèces à cultiver, les forêts du Nord se peupleraient d'espèces méditerranéennes et les forêts méditerranéennes proprement dites disparaîtraient, tout comme les coraux, vraisemblablement. Selon le Haut Conseil pour le climat, vers 2071-2100 en France, on compterait en moyenne entre 65 et 105 nuits par an avec des températures minimales supérieures à 20 °C sur tout le pourtour méditerranéen et le littoral corse. Des poussées du thermomètre gagnant 50 °C l'été auraient deux fois plus de chances de survenir. Les risques de feux gigantesques atteindraient la Loire. Le littoral serait grignoté dans le Pas-de-Calais et le Nord. Une grande partie du marais poitevin, une partie de La Rochelle (Charente-Maritime) les alentours des communes de Redon (Ille-et-Vilaine) ou de Libourne (Gironde), des quartiers de Cannes ou encore l'aéroport de Nice (Alpes-Maritimes) se retrouveraient sous l'eau autour de la moitié du siècle. Le 1,5 million de métropolitains vivant dans des zones inondables littorales serait menacé.

Les températures moyennes en été



À la fin du XXIe siècle, la majeure partie de l'Hexagone pourrait avoir des températures estivales minimales supérieures à 20 °C, avec des pointes à 50 °C deux fois plus probables.

BRUNO BOURGEOIS. SOURCE : HAUT CONSEIL POUR LE CLIMAT

changements autorenforçants, graves et irréversibles du système climatique pourraient se produire beaucoup plus tôt et à des niveaux de réchauffement plus faibles qu'auparavant », assène l'OCDE. Certains sont déjà en cours. D'autres seront activés dès le dépassement de la limite de 1,5 °C de réchauffement mondial, des points de non-retour étant alors possiblement franchis. Au-delà de + 2 °C, nous affronterions un risque d'effet domino. Cette redoutable perspective résulte notamment des travaux internationaux dirigés par Tim Lenton, de l'université d'Exeter (Royaume-Uni) publiés dans *Science* en septembre 2022. Même alarme chez Johan Rockström, directeur du Centre pour la résilience de Stockholm (Suède) et coauteur d'une étude internationale, publiée en 2018 dans les *PNAS*, alertant sur le risque que la Terre puisse se transformer en « étuve » d'ici quelques décennies : *« Passer le seuil de 2 °C entraînerait inévitablement et rapidement une température de 4 à 5 °C plus élevée qu'à la période préindustrielle,* met en garde le scientifique. *Des endroits sur Terre deviendront inhabitables si la "Terre étuve" devient une réalité.* »

Une accélération de l'élévation du niveau de la mer

Pour comprendre l'emballement qui menace, il faut savoir que le franchissement d'un point de basculement est susceptible de modifier le climat à l'échelle locale ou mondiale. Au niveau régional, chacun d'entre eux est associé à différents types d'impacts potentiellement graves, tels que des températures extrêmes, une fréquence accrue de sécheresses, des feux de forêt et des conditions météorologiques sans précédent. De surcroît, *« à l'échelle mondiale, les points de rupture entraîneraient des répercussions planétaires, par exemple en contribuant à des émissions supplémentaires de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, à des boucles de rétroac-*

ANTARA FOTO/XULUS SATRIA WIJAYA/REUTERS

Des événements extrêmes tels que des inondations vont s'intensifier au niveau local si la hausse du réchauffement mondial se poursuit (ici, après des pluies torrentielles en février 2020 à Bekasi, en Indonésie).

tion des températures, ou encore à une accélération de l'élévation du niveau de la mer », souligne Tim Lenton.

Prenons la fonte de la calotte glaciaire au Groenland. Localement, elle va se traduire par un réchauffement et un changement dans le régime des précipitations qui affecteront les habitants. Mais ils ne seront pas les seuls concernés. D'abord, le pergélisol, qui couvre 90 % du Groenland, sera inondé et relarguera quantité de méthane, accélérant le phénomène mondial de réchauffement. Ensuite, cette fonte pourrait à elle seule faire monter le niveau moyen de la mer de 1 mètre, une mauvaise nouvelle pour les régions côtières situées à faible altitude qui abritent près de 10 % de la population mondiale *(lire l'encadré ci-contre)*. Pertes d'écosystèmes, salinisation des eaux souterraines, inondations, dommages sur les infrastructures sont inévitables. Sans compter que les épisodes de submersion, comme ceux provoqués par les tempêtes Katrina (États-Unis, 2005), Xynthia (Europe, 2010), ou encore par le typhon Haiyan (Asie, 2013) seront exacerbés par le changement climatique, prévoit le Giec. À terme, des déplacements de populations dans le delta du Bangladesh, par exemple, ou sur des îles déjà menacées comme Tuvalu, dans l'océan Pacifique sud, sont inéluctables. L'île de Manhattan (États-Unis) ou Jakarta (Indonésie) sont menacées de submersion dès 2050. Mais ce n'est pas tout : la fonte des glaces terrestres groenlandaises provoquera un afflux d'eau douce susceptible de déstabiliser davantage les courants de surface et profonds de la Circulation méridienne de retournement de l'Atlantique (Amoc), un ensemble de courants marins dont fait partie le Gulf Stream. Résultat : un rafraîchissement au nord et un réchauffement au sud, qui affectera notamment la croissance des trois principales cultures de base — le blé, le maïs et le riz, qui fournissent plus de 50 % des calories mondiales. *« Pour le blé, l'impact sera planétaire, alors que pour le maïs et le riz ce sont l'Europe, la Russie et la partie nord de l'Amérique du Nord qui souffriront particulièrement »* précise Hannah Ritchie de l'université d'Édimbourg (Royaume-Uni).

La bonne nouvelle, c'est que des solutions existent

La température moyenne terrestre continue d'augmenter à un rythme de 0,17 °C par décennie. *« Il est donc d'autant plus urgent de réduire drastiquement les émissions au cours de la décennie actuelle »*, estime aujourd'hui l'OCDE. Le rapport *« fournit des recommandations sur la façon dont les stratégies de gestion des risques climatiques peuvent mieux refléter les risques de points de basculement dans les domaines de l'atténuation, de l'adaptation et de l'innovation technologique. »* Car la bonne nouvelle est que des solutions existent. Seront-elles appliquées ? ■ **R. M.**

HANNAH RITCHIE

« Pour la croissance du blé, l'impact sera planétaire. Pour le maïs et le riz, l'Europe, la Russie et le nord de l'Amérique du Nord seront affectés »

Hannah Ritchie, chercheuse à l'université d'Édimbourg (Royaume-Uni)

POUR EN SAVOIR PLUS

L'organisation Gobal Carbone Project
▸ sciav.fr/912carbone

Résumé et synthèse de l'OCDE sur les points de basculement climatique
▸ sciav.fr/912OCDE

Le rapport PNUE
▸ sciav.fr/912PNUE

L'analyse du Haut Conseil pour le climat
▸ https://bit.ly/912hautconseil

Le défi d'un refroidissement climatique

Plusieurs ténors de la climatologie estiment pouvoir refroidir la planète en développant massivement les énergies renouvelables, en éliminant les gaz frigorigènes, en réduisant le gaspillage alimentaire ou en favorisant le tassement du pergélisol… La liste des solutions est longue.

« *L'idée aujourd'hui n'est pas seulement de stopper le changement climatique mais d'inverser son cours.* » À rebours du discours catastrophiste, Zeke Hausfather, directeur du climat et de l'énergie au Breakthrough Institute d'Oakland (États-Unis), estime dans une tribune du *Guardian* de novembre 2022, que c'est « *compliqué* », mais possible : « *Si nous parvenons à réduire les émissions de gaz à effet de serre à zéro, le monde arrêtera effectivement de se réchauffer,* explique ce contributeur du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). *Et les modèles climatiques montrent que si nous éliminons plus de CO_2 de l'atmosphère que nous n'en émettons, cela refroidira en fait le monde.* » Le chercheur se concentre sur le développement des techniques d'élimination permanente du carbone *(lire p. 51)*, sur un plan scientifique mais aussi financier. « *Pratiquement tous les modèles climatiques suggèrent que nous devons éliminer 6 milliards de tonnes de CO_2 par an d'ici à 2050* [soit 168 milliards de tonnes au total] *parallèlement à des réductions rapides des émissions pour ramener les températures à 1,5 °C d'ici à la fin du siècle* », énonce-t-il. Un défi pour lequel il se montre « *prudemment optimiste* ». « *Il faut amplifier les points de basculement positifs qui pourront entraîner d'autres changements favorables en cascade, dans un effet domino* », renchérit Tim Lenton, directeur du Global Systems Institute à l'université d'Exeter (Royaume-Uni). Connu pour avoir détaillé les points de basculement négatifs qui pourraient accélérer la crise climatique *(lire p. 42)*, il analyse aussi les leviers contraires. De l'agroforesterie *(lire p. 57)* à la régénération des écosystèmes, en passant par la politique et l'opinion publique… « *Certains points de basculement positifs sont déjà en cours* », explique-t-il, citant volontiers l'abandon du charbon au Royaume-Uni ou la grève de l'école de la militante écologiste suédoise Greta Thunberg, suivie d'un mouvement social massif qui a conduit le Parlement européen à voter la déclaration d'une urgence climatique en novembre 2019. Un autre cap majeur, selon lui, est que « *des gouvernements représentant plus de 70 % du PIB mondial ont adhéré au "breakthrough agenda" de l'UNFCCC (Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques)* » qui les informe des

INITIATIVES

L'argent des milliardaires à la rescousse

Selon le projet Drawdown de Paul Hawken, il faudrait investir, d'ici à 2050, 14 691 milliards d'euros pour limiter le réchauffement climatique à 2 °C, et 22 217 milliards d'euros pour le contenir à 1,5 °C. Mais les économies à long terme seraient supérieures à l'investissement. Des initiatives privées fleurissent. La société belge Econopolis vient de lancer son Climate Fund en Suisse, inspiré de l'approche de Paul Hawken qui prône des solutions. Stripe, une plateforme d'infrastructure financière pour les entreprises, a lancé Frontier, un programme d'engagement de marché avancé de 925 millions de dollars, aux côtés d'Alphabet (ex-Google), de Shopify, Meta et McKinsey sur les technologies d'élimination du carbone. En garantissant de l'argent à l'avance, il signale aux entrepreneurs et aux chercheurs que s'ils développent ces technologies à un stade précoce, il les achètera. Cette approche a été testée il y a dix ans pour accélérer le développement des vaccins contre le pneumocoque dans les pays à faible revenu et a sauvé environ 700 000 vies.

FRANÇOIS HENRY/REA

Très peu émetteur de carbone, le nucléaire n'est pas la panacée, selon le Giec. Son coût, sa lenteur de développement, ainsi que les problèmes de sûreté et de sécurité le rendent inaccessible pour de nombreux pays (ici, la centrale du Bugey, dans l'Ain).

opportunités et de la manière dont ils peuvent agir, en lien avec les acteurs non étatiques, villes, régions, entreprises, investisseurs, ONG. L'initiative, lancée en 2021 lors de la COP26 à Glasgow, a identifié 28 actions prioritaires pour décarboner les secteurs de l'électricité, du transport routier, de l'acier, de l'hydrogène et de l'agriculture, conformément aux objectifs de l'accord de Paris *(lire p. 42)*. À l'analyse, elle recoupe les recommandations du Giec d'avril 2022 : dans un rapport du groupe de travail 3, consacré à l'atténuation du changement climatique, il évalue les solutions possibles sur les plans technique, politique et socio-économique. Il estime notamment que tous les pays doivent réduire considérablement leur utilisation de combustibles fossiles, étendre l'accès à l'électricité, améliorer l'efficacité énergétique, accroître l'utilisation de combustibles alternatifs ou encore créer des villes compactes.

Paul Hawken, entrepreneur et environnementaliste américain respecté, est encore plus ambitieux. Il estime avoir démontré de façon plausible comment économiser plus de 1000 milliards de tonnes de carbone d'ici à 2050 ! C'est le projet Drawdown (retrait, prélèvement en anglais), qui hiérarchise, au travers de savants calculs, plus d'une centaine de solutions selon leur efficacité à diminuer la quantité de gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère. *« Drawdown n'est ni optimiste ni pessimiste, mais réaliste,* assure l'auteur du livre éponyme, traduit en France chez Actes Sud en 2018. *Nous avons défini un but : inverser la courbe de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, qui a atteint, au XXe siècle, un niveau jamais vu sur Terre depuis vingt millions d'années. Et voulu vérifier s'il était atteignable d'ici à 2050.* »

BREAKTHROUGH INSTITUTE

« Si nous parvenons à réduire les émissions de gaz à effet de serre à zéro, le monde arrêtera effectivement de se réchauffer »

Zeke Hausfather, directeur du climat et de l'énergie au Breakthrough Institute d'Oakland (États-Unis)

Un modèle de calcul pour identifier les meilleures solutions

Son réseau de chercheurs a donc développé un modèle de calcul permettant d'identifier les meilleures solutions à développer parmi celles déjà existantes, connues, opérationnelles, pour stocker du carbone ou éviter d'en émettre : boisement, covoiturage, planification familiale, chauffe-eau solaire… Au top 10, figurent l'élimination des gaz frigorigènes *(lire p. 61)*, le développement de l'éolien en mer *(lire p. 49)*, la réduction du gaspillage alimentaire ou encore le tassement du pergélisol au moyen du pâturage *(lire p. 52)*… *« Nous avons modélisé le développement de chaque solution, en nous appuyant sur des données provenant de revues relues par les pairs et d'institutions reconnues comme la FAO ou la Banque mondiale* », précise Paul Hawken. Son site Web présente un *« manuel du quoi faire pour tous les niveaux de la société, des individus aux gouvernements nationaux* ». Sa base de données, qui mobilise désormais une coalition internationale de 200 scientifiques, ne cesse de s'étoffer ou de s'affiner depuis 2014, au gré des découvertes et des progrès. Après avoir recoupé les meilleures propositions des différentes parties, il a été cruellement difficile de choisir les solutions à présenter ici. C'est la deuxième bonne nouvelle de ce dossier : il y en a pléthore. ■ **R. M.**

JEAN-PHILIPPE DELOBELLE / BIOSPHOTO

ÉNERGIE

Le grand bond en avant du renouvelable

La crise mondiale liée à la guerre en Ukraine accélère la transition énergétique. Une transformation d'autant plus rapide que désormais l'éolien, le solaire ou la géothermie deviennent moins chers que le pétrole ou le gaz.

Certains économistes appellent cela « la théorie du coup de pied aux fesses ». Elle pose que les humains n'agissent réellement que lorsqu'ils sont au pied du mur. Ce pourrait être le cas en cet hiver 2022-2023 dans le domaine de l'énergie. Dans son dernier rapport annuel, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) enregistre une accélération jamais vue du développement des énergies renouvelables. La raison ? La crise mondiale provoquée par la guerre en Ukraine. Le conflit accélère la transition énergétique du fait du boycott européen du gaz russe. Selon l'AIE, 2400 gigawatts (GW) d'éolien, de solaire, de bioénergies devraient être installés d'ici à 2027, soit l'équivalent en cinq ans de ce qui a été mis en place depuis le début du siècle. Ces 5000 GW représenteront dans cinq ans 38% du mix énergétique mondial.

L'Union européenne est évidemment concernée au premier chef. Mais les États-Unis ont également adopté cet

La production éolienne française devrait doubler d'ici à 2027 avec le développement de nouveaux parcs sur terre (ici dans la plaine de Crau, Bouches-du-Rhône) et en mer.

été leur « Inflation Reduction Act » qui alloue 40 milliards d'euros de prêts aux énergies renouvelables d'ici à 2026. Le 14e plan quinquennal chinois 2022/2027 prévoit 1200 GW de nouvelles capacités, soit un doublement de son parc actuel. Paradoxalement, sa part dans la production de l'éolien et du photovoltaïque va cependant régresser de 90 à 75 % sur cette période, tant l'effort mondial est intense. Selon l'AIE, la production du solaire et de l'éolien va dépasser celle du charbon en 2025. Le monde retrouverait ainsi la trajectoire qui doit le mener au « zéro émission nette » en 2050. Une accélération d'autant plus rapide que les énergies renouvelables sont désormais moins chères que les énergies fossiles dans les deux tiers des États, avec un coût autour de 70 euros le mégawattheure (MWh). En France, les oppositions à la loi sur l'accélération des énergies renouvelables apparaissent à contre-courant de la tendance mondiale. L'État s'est pourtant engagé en 2021 à couvrir plus de 40 % de ses besoins par ces moyens dès 2030.

ÉOLIEN

Une montée en puissance

252 mètres ! C'est la taille du rotor (le diamètre des pales) de l'éolienne présentée en novembre 2020 par le constructeur chinois Three Gorges Corporation. La puissance obtenue est de 16 mégawatts (MW), soit environ un centième de celle d'un réacteur nucléaire EPR, record mondial en cours. Partout dans le monde, les éoliennes gagnent en hauteur et en puissance, laquelle est directement liée à la longueur des pales. La puissance moyenne des machines actuelles est de 7 MW. Les 15 MW sont visés pour les prochaines années. En théorie, les 20 MW peuvent être atteints. Des éoliennes plus puissantes, c'est l'assurance de produire plus sur un espace moindre et donc d'abaisser drastiquement les coûts de production. La multiplication des parcs *offshore* favorise cette course puisqu'en mer, il n'y a pas d'obstacles.

L'augmentation de la puissance unitaire des éoliennes et la multiplication des parcs expliquent que la production éolienne devrait doubler d'ici à 2027 grâce à 570 GW supplémentaires. Encore ne parle-t-on que des technologies matures. Les parcs éoliens flottants et les premières exploitations de leur énergie arrivent sur le marché. En France, deux parcs flottants de 250 MW au total seront installés dans le golfe du Lion en Méditerranée à partir de cette année et le premier parc hydrolien au raz Blanchard, dans le Cotentin, doit démarrer sa production en 2025.

PHOTOVOLTAÏQUE

Des technologies très prometteuses

Ses promesses sont telles que l'AIE prédit qu'en 2040, la puissance installée du solaire sera la première de toutes les énergies. L'industrie est en train de s'emparer de technologies très prometteuses. Issues des laboratoires du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies renouvelables (CEA), les cellules en hétérojonction marient le silicium monocristallin et le silicium amorphe, ce qui permet de mieux capter les photons. La face arrière de ces panneaux est également active, ce qui autorise des rendements de 24 %, contre 19 % pour les meilleures cellules actuelles. De plus, la pérovskite arrive. Le programme européen Pepperoni a annoncé fin novembre 2022 la création d'un pilote industriel de cellules combinant le silicium cristallin traditionnel avec une fine couche de pérovskite qui va permettre de capter un plus large spectre du rayonnement solaire. Nombre de chercheurs estiment que les rendements des futurs panneaux dépasseront les 30 %. Par ailleurs, les films minces et le solaire organique pointent leur nez. L'entreprise nantaise Armor, qui développe depuis 2019 une chaîne de fabrication de ces modules souples, vient de voir ses innovations reconnues par la Commission européenne. Un coup de pouce pour une technologie qui devrait permettre au solaire de s'installer dans les voitures, sur les enveloppes des bâtiments et sur les vêtements ! Partout dans le monde, le solaire occupe les surfaces aujourd'hui inutiles. En France, la loi d'accélération des énergies renouvelables va ainsi obliger à équiper d'ombrières photovoltaïques toutes les places de parking des supermarchés, hôpitaux et entreprises.

JEAN-FRANÇOIS NOBLET / BIOSPHOTO

Le photovoltaïque devrait représenter en 2040 la première des énergies en puissance dans le monde (ici la centrale des Mées, Alpes de Haute-Provence).

BIOGAZ

Un secteur en croissance

En 2040, la France aura gagné son indépendance gazière. Le gestionnaire du réseau GRTgaz mise sur trois technologies aux différents degrés de maturité. La première, en déploiement, est la méthanisation. Les déchets agricoles, les résidus de l'industrie agroalimentaire et des poubelles des consommateurs sont désormais traités par des digesteurs qui produisent du méthane. Le potentiel est estimé à 130 térawattheures (TWh), soit 40 % des 320 TWh de consommation prévus pour 2050. La croissance du secteur est actuellement supérieure à 10 % par an.

La pyrogazéification consiste, elle, à brûler dans une atmosphère appauvrie en oxygène des déchets solides. Cette combustion génère des gaz mélangés dont une majorité de méthane. Le gisement est constitué des restes de l'exploitation forestière et de l'industrie du bois, mais aussi des produits de consommation en fin de vie comme des meubles, des tissus, des chiffons. Le gisement est estimé à 2,5 millions de tonnes par an.

Enfin, les gaziers placent beaucoup d'espoir dans la méthanation, une manière de stocker l'énergie produite en excès les jours de grand vent ou de fort ensoleillement. Cette électricité « verte » alimente des catalyseurs qui vont produire de l'hydrogène, lequel peut être soit injecté directement dans le réseau, soit mis en réaction avec du CO_2 capté à la cheminée d'une usine voisine pour produire du méthane. À Fos-sur-Mer (Bouches-du-Rhône), le projet Jupiter 1000 explore cette voie depuis 2020.

HYDROGÈNE

Une filière en devenir

Quelle place pour l'hydrogène ? La molécule pourrait bien s'immiscer dans les mix énergétiques, notamment dans les transports et l'industrie. Ainsi, Arcelor Mittal ambitionne de remplacer totalement le coke qu'il utilise actuellement dans son usine sidérurgique de Dunkerque (Nord) par de l'hydrogène, et ce d'ici à la fin de la décennie. Pour être compatible avec la lutte contre le changement climatique, cet hydrogène doit être produit à partir d'énergies renouvelables et non de gaz naturel comme c'est aujourd'hui le cas. Son développement est donc lié à celui de l'éolien et du solaire. L'Allemagne et la France ont décidé de financer cette solution à hauteur de 9 milliards d'euros chacune pour faire décoller la filière. France Hydrogène a construit un scénario de « massification » qui s'appuie d'abord sur un usage croissant dans le raffinage et la sidérurgie. Dans le domaine de la mobilité, ce sont les camions et bus qui sont visés dans un premier temps, puis à moyen terme, le rail. 225 stations de recharge hydrogène devraient être opérationnelles d'ici à 2025. Au total, France Hydrogène estime que la France pourra produire un peu plus d'un million de tonnes d'hydrogène vert en 2030, destiné aux trois quarts à l'industrie dans un premier temps. Cette production est anecdotique aujourd'hui.

GAEL KERBAOL / DIVERGENCE

La géothermie capte la chaleur dans les couches de surface ou profondes du sous-sol pour alimenter les logements en eau chaude et en chauffage (ici un forage à Bagneux, Hauts-de-Seine).

GÉOTHERMIE

Une énergie sous-exploitée

C'est la grande oubliée des énergies renouvelables. Entre les pompes à chaleur et les forages en grande profondeur qui chauffent des quartiers entiers, notamment en région parisienne, émerge la géothermie de surface qui équipe déjà près de 200 000 habitations individuelles et 12 000 immeubles. Au lieu d'utiliser les calories présentes dans l'air, ces systèmes captent celles emmagasinées dans les premiers mètres de sol — jusqu'à 100 mètres pour les réalisations les plus profondes. La chaleur captée est compressée pour produire une vapeur haute pression distribuée dans les radiateurs du logement. À partir d'un sol à 12 °C, on peut ainsi produire de l'eau à 50 °C, et ce toute l'année, au contraire des pompes à chaleur à air qui cessent d'être efficaces quand les températures deviennent négatives.

Aujourd'hui, la France ne couvre que 22,3 % de ses besoins en chaleur à par-

▶ Et demain ?

LA PHOTOSYNTHÈSE DE CARBURANTS SOLAIRES

Produire du carburant à partir d'eau et de soleil en opérant une photosynthèse artificielle dix fois plus efficace que la naturelle, c'est la prouesse réalisée par Daniel Nocera et Pamela Silver, de l'université Harvard (États-Unis). Une fois plongée dans l'eau, leur feuille bionique absorbe l'énergie du soleil, puis, grâce à un catalyseur métallique (du phosphate de cobalt), sépare les molécules d'eau en oxygène et en hydrogène. Une bactérie, *Ralstonia eutropha*, permet ensuite de « convertir » l'hydrogène en différents combustibles liquides (isopropanol), en précurseur de bioplastique, en engrais ou en autres molécules carbonées. D'autres laboratoires sont sur les rangs et espèrent obtenir des rendements permettant l'exploitation du procédé à grande échelle pour les pays en voie de développement. **R. M.**

tir des énergies renouvelables alors que la géothermie est pertinente sur 98 % du territoire. L'objectif est de 38 % en 2030. Il faudrait faire encore mieux : le chauffage dépend encore à 65 % des énergies fossiles.

STOCKAGE ET DISTRIBUTION

La révolution des réseaux intelligents

L'argument selon lequel le soleil ne brille pas la nuit et le vent ne souffle pas tout le temps pour vilipender l'intermittence des énergies renouvelables ne va bientôt plus tenir grâce au travail des milliers d'ingénieurs en passe de résoudre ce problème au moyen du stockage. Pionnière, la société française Corsica Sole a annoncé le 1er décembre dernier la mise en service de la plus grande centrale de stockage d'électricité d'Europe. Installée à Deux-Acren (Belgique), cette unité constituée de batteries lithium-ion est capable de stocker 100 MWh d'électricité, ce qui va contribuer à réguler la fréquence sur le réseau de transport électrique européen.

Cette arrivée à l'échelle du réseau continental doit beaucoup aux multiples expérimentations de « réseaux intelligents » qui se sont déroulées un peu partout en Europe ces vingt dernières années. L'électricité ne descendra plus d'une grosse centrale électrique vers le consommateur, mais empruntera des chemins plus complexes régulés par intelligence artificielle, principalement à l'échelle locale. Le gestionnaire du réseau de transport d'électricité français RTE a en effet identifié l'autoconsommation comme la révolution à venir. Les expériences de mutualisation de la production de panneaux photovoltaïques ou de petit éolien à l'échelle de quartiers se multiplient avec l'appui de l'opinion. ■ **L. C.**

CAPTURE DE CO_2

Piéger les gaz à effet de serre

Les technologies permettant de capter le dioxyde de carbone et de le stocker ou de le réutiliserdans l'industrie ont beaucoup progressé.

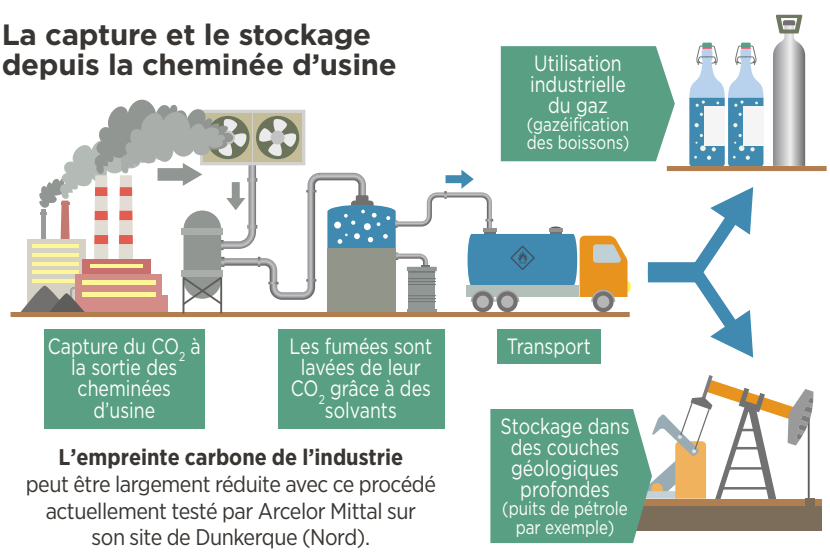
Après beaucoup de réticences et de débats, la capture et le stockage du CO_2 sont reconnus depuis le dernier rapport du Giec en 2022 comme une technique qui peut aider à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à atteindre le « zéro émission nette » en 2050. Mais le groupe d'experts du climat prévient : son apport ne peut intervenir qu'en complément des efforts de réduction des émissions pour traiter les rejets résiduels, ceux que l'on ne pourra pas éviter. Dans l'esprit des scientifiques, ce n'est donc pas la panacée, juste une béquille. Les industriels s'emparent cependant de la solution.

CAPTAGE INDUSTRIEL

Le traitement des fumées

Pour les sites industriels, la solution pour « laver » les fumées est d'utiliser des solvants, des amines, qui les débarrassent de leur CO_2. Le gaz est ensuite récupéré, compressé et acheminé par bateau vers des couches géologiques profondes, notamment celles des gisements de pétrole, où les roches peuvent l'absorber et dans lesquelles il se transforme en carbonates. La solution est onéreuse, mais elle pourrait devenir rentable si le prix de la tonne de carbone émise devait dépasser les 100 euros (contre 85 euros

La capture et le stockage depuis la cheminée d'usine


Utilisation industrielle du gaz (gazéification des boissons)
Capture du CO_2 à la sortie des cheminées d'usine
Les fumées sont lavées de leur CO_2 grâce à des solvants
Transport
Stockage dans des couches géologiques profondes (puits de pétrole par exemple)

L'empreinte carbone de l'industrie peut être largement réduite avec ce procédé actuellement testé par Arcelor Mittal sur son site de Dunkerque (Nord).

BRUNO BOURGEOIS

début 2023), ainsi que vise la réforme en décembre 2022 du marché européen du carbone. Elle est d'ores et déjà testée depuis mars 2022 sur le site sidérurgique d'Arcelor Mittal à Dunkerque. Les ingénieurs vérifient les performances d'une colonne de lavage de 22 mètres de haut qui peut capter 4000 tonnes de CO_2 par an sur les 11 millions de tonnes émises tous les ans par le site. En configuration industrielle, plusieurs colonnes pourront traiter 125 tonnes par heure, soit un million de tonnes par an. La géographie du site est idéale : le CO_2 sera acheminé à une station de chargement de bateaux en cours de construction pour être injecté dans les gisements de pétrole épuisés de la mer du Nord. Dunkerque pourrait ainsi drainer les effluents du bassin industriel du Nord. Des laboratoires recherchent par ailleurs de nouveaux usages industriels pour le CO_2 qui sert déjà pour la gazéification des boissons, les chaînes de plats surgelés, le traitement de l'eau, etc. 150 millions de tonnes sont utilisées ainsi tous les ans, ce qui demeure très peu au regard des 36 milliards de tonnes émises par l'activité humaine.

CAPTAGE DANS L'AIR

Une technique énergivore

Et si on captait directement le carbone dans l'air ? C'est l'idée mise en œuvre par quelques sociétés dans le monde dont une entreprise suisse, Climeworks.

SERGIO RAMAZZOTTI/PARALLELO ZERO

Le CO_2 capté et comprimé peut être utilisé dans de nombreux domaines (ici pour la chaîne du froid).

Le principe : d'énormes ventilateurs aspirent l'air, le font passer à travers un matériau solide en nanofibres de cellulose couplées à des amines qui capte le CO_2, et c'est un souffle appauvri en carbone qui ressort de la machine. Quand les filtres arrivent à saturation, ils sont isolés puis chauffés à environ 100 °C pour provoquer le relargage du CO_2 pur et la régénération du matériau. Le dioxyde de carbone est alors comprimé et acheminé soit à une unité industrielle qui le recyclera, soit enfoui dans des couches géologiques profondes. La technique est cependant très énergivore. Aussi Climeworks installe-t-elle ses unités là où les énergies renouvelables sont abondantes, comme l'Islande et sa géothermie, ou à proximité d'un industriel prêt à racheter le gaz — actuellement à un prix très élevé —, telle la filiale suisse de Coca-Cola, ce qui permet de se donner une image « verte ». Cette façon de compenser ses émissions intéresse d'autres industriels comme Microsoft ou la banque suisse UBS, et même des particuliers qui ambitionnent d'être dès aujourd'hui neutres en carbone.

CAPTAGE PAR LES SOLS

Une méthode naturelle

La meilleure façon de capter le CO_2 demeure celle naturellement mise en œuvre par les plantes et les sols. Par la photosynthèse et l'enfouissement dans le sol, le couvert végétal mondial en absorbe 11 milliards de tonnes chaque année. Mais ce « puits » de carbone s'essouffle du fait des sécheresses de plus en plus nombreuses avec le changement climatique. L'idée est donc d'utiliser les techniques agronomiques pour le revivifier. Agroforesterie, agroécologie, agriculture de conservation, reforestation sont des outils qui peuvent doubler ce captage naturel. Ainsi, le puits de carbone français, évalué à 54 millions de tonnes par l'Union européenne, se limite aujourd'hui à 40 millions de tonnes du fait de l'affaiblissement de la végétation, mais l'objectif est de 80 millions de tonnes en 2050 grâce à l'adoption des meilleures pratiques agronomiques climatiques. En novembre 2022, la Commission et le parlement européens se sont accordés sur une certification des projets agricoles et forestiers garantissant un stockage de carbone afin de les rémunérer. Des méthodologies permettent de mesurer précisément les volumes de CO_2 détournés de l'atmosphère. La Commission espère ainsi convaincre un plus grand nombre d'exploitants de changer de voie. ■ **L. C.**

▶ Et demain ?

REPEUPLER LA TOUNDRA ET CONVERTIR LE MÉTHANE

Pour garder la planète au frais, il faut que les régions subpolaires soient couvertes d'herbes et non d'arbres. Y faire paître une faune d'herbivores adaptée (bisons, chevaux de Przewalski) permettrait de tasser les sols et de limiter la libération du méthane, selon le projet du parc pléistocène *(lire* S. et A *n° 818)*. Une autre solution consiste à capter le méthane — 81 fois plus puissant que le CO_2 en matière de réchauffement du climat au cours des vingt premières années —, puis à accélérer sa transition (inéluctable) en dioxyde de carbone et en eau, avant de le capturer et de le stocker, estime Rob Jackson de l'université Stanford (États-Unis). Le méthane est difficile à capturer dans l'air car sa concentration est faible, mais il parie sur une classe de matériaux cristallins, les zéolites, capables d'absorber le gaz. **R. M.**

STEFANO GIOVANNINI/REDUX-REA

Ces deux tours d'habitation végétalisées du « Bosco Verticale », à Milan (Italie), abritent une forêt urbaine d'une superficie équivalente à 2 hectares.

VILLE

Un écosystème citadin à développer

Le grand défi de la rénovation urbaine va de pair avec la construction de villes durables et l'adoption de technologies innovantes.

C'est le grand chantier du XXIe siècle : les zones urbaines, qui génèrent 67 % des gaz à effet de serre planétaires, devront accueillir 2,5 milliards d'individus en plus d'ici à 2050 tout en tendant vers la neutralité carbone. Au sein du réseau C40, les maires d'une centaine de grandes villes du monde — dont Paris —, représentant 582 millions de personnes et un cinquième de l'économie de la planète, s'engagent à ce que 30 à 40 % de la surface de leur cité soit constituée d'ici à 2030 d'espaces verts (forêt urbaine, rues bordées d'arbres, végétation intégrée aux bâtiments) ou perméables (chaussées et tranchées d'infiltration, bassin de rétention, agriculture urbaine régénérative). Mais aussi à ce que 70 % de la population ait accès en 15 minutes à un espace vert ou bleu. Au-delà, les projets de villes durables, intelligentes, résilientes insufflent espérance et émerveillement. La cité, ses architectures, ses réseaux, constituent en effet une source inépuisable d'innovations pour l'eau, l'énergie, l'éclairage, etc. Évidemment, la révolution ne passera pas par quelques écoquartiers aux bâtiments high-tech avec toitures végétalisées. C'est tout un espace qu'il faut réorganiser pour créer des « écosystèmes citadins » écologiques et sociaux, estime le Comité 21 (Comité français pour l'environnement et le développement durable).

URBANISME

Des villes compactes et piétonnes

C'est l'une des recommandations du Giec (groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat) : en finir avec l'étalement urbain et ses espaces segmentés, reliés par de grands axes routiers, modelés pour l'automobile au XXe siècle, avec son cortège de pollutions délétères. Place au concept de la « ville du quart d'heure », peaufiné par Carlos Moreno, professeur à l'université Paris-I Panthéon-Sorbonne. Selon ses plans, le quartier modèle a son centre, l'école, autour de laquelle gravitent des espaces sportifs ou culturels (les lieux devenant flexibles), des parcs, des centres de soins, des commerces et une ressourcerie pour réparer les objets du quotidien. Accessibles à tous en 15 minutes à pied ou à vélo. Portland, aux États-Unis, est la première à s'y être essayée en 2009 avec son concept de « voisinage à 20 minutes ». Barcelone, en Espagne, a créé des « îles », espaces végétalisés où commerces et piétons ont

remplacé les voies rapides. Paris, Milan, New York affinent leurs projets depuis la pandémie de Covid-19, gardant en tête que le télétravail, également recommandé par des climatologues, pourrait se généraliser demain. Mais les futures villes bas-carbone n'ont pas toutes les mêmes défis à relever, concède le Giec qui distingue trois catégories de zones urbaines. Les villes « établies » devront remplacer ou moderniser l'infrastructure existante et électrifier les transports *(lire p. 55)*. Les villes « à croissance rapide » devront imaginer des moyens pour maintenir de courtes distances entre domicile et travail. Les villes nouvelles pourront planifier des espaces avec tous les services à proximité.

ÉCLAIRAGE

La généralisation des LED

En 1994, trois scientifiques japonais ont mis au point des ampoules LED bleues à forte luminosité, recréant la lumière blanche du soleil, tirant ainsi le meilleur parti de l'invention, en 1874, de la diode, un semi-conducteur de cristal laissant passer le courant dans un seul sens. Aujourd'hui, l'efficacité des lampes LED permet d'économiser jusqu'à 70 % d'énergie pour l'éclairage. Disponibles sous forme de tubes, ampoules, spots, bandes, elles peuvent être reliées à des panneaux solaires et remplacer les lampes à pétrole dans un foyer en pleine campagne comme éclairer tout un site industriel. À raison d'une utilisation de cinq heures par nuit, un luminaire LED peut durer vingt-sept ans, ce qui en fait la source de lumière artificielle la moins onéreuse de la planète. *« Chaque jour, 30 milliards de lampes sont allumées dans le monde, ce qui représente environ 15 à 20 % de l'électricité mondiale consommée »*, estime Nicolas Grandjean, professeur à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse), soit plus que la production de toutes les centrales nucléaires (10,1 % en 2019). La généralisation de ces LED chez les particuliers ou dans les bâtiments commerciaux d'ici à 2050 figure, selon le projet Drawdown *(lire p. 47)*, parmi les 40 premières solutions pour renverser le cours du changement climatique.

ISOLATION

Des bâtiments rénovés et performants

L'infiltration d'air dans les bâtiments représente 25 à 60 % de l'énergie pour chauffer ou rafraîchir un foyer : un pur gâchis, selon le Green Building Council américain. Isoler les passoires thermiques, ou construire des structures plus étanches est une priorité. Gare toutefois à l'effet rebond : une étude de l'université de Cambridge (Royaume-Uni) de janvier montre que les ménages britanniques ayant isolé leurs combles ou greniers achètent de nouveaux appareils électriques ou construisent des vérandas, de sorte que les économies d'énergie disparaissent quatre ans après la rénovation.

Le choix des matériaux isolants s'est étoffé : du chanvre, de la laine (de verre ou de mouton), du polystyrène sous forme de plaque ou de mousse, des panneaux réfléchissants (qui renforcent la chaleur rayonnante), du plumage de volaille, ou des peaux extérieures aux couches de matières savamment disposées. Pour les constructions nouvelles, le pouvoir de l'isolation est poussé à l'extrême avec la *Passivhaus* (maison passive en français), un concept allemand qui permet une économie énergétique de 90 % par rapport aux bâtiments classiques, grâce à une enveloppe totalement hermétique constituée notamment de murs et toits épais, de jointures et charnières bouchées, de triple vitrage et d'une ventilation mécanique. Certaines de ces maisons passives sont tellement performantes qu'elles peuvent être entièrement chauffées avec l'équivalent de la puissance électrique d'un sèche-cheveux. ■ **R. M.**

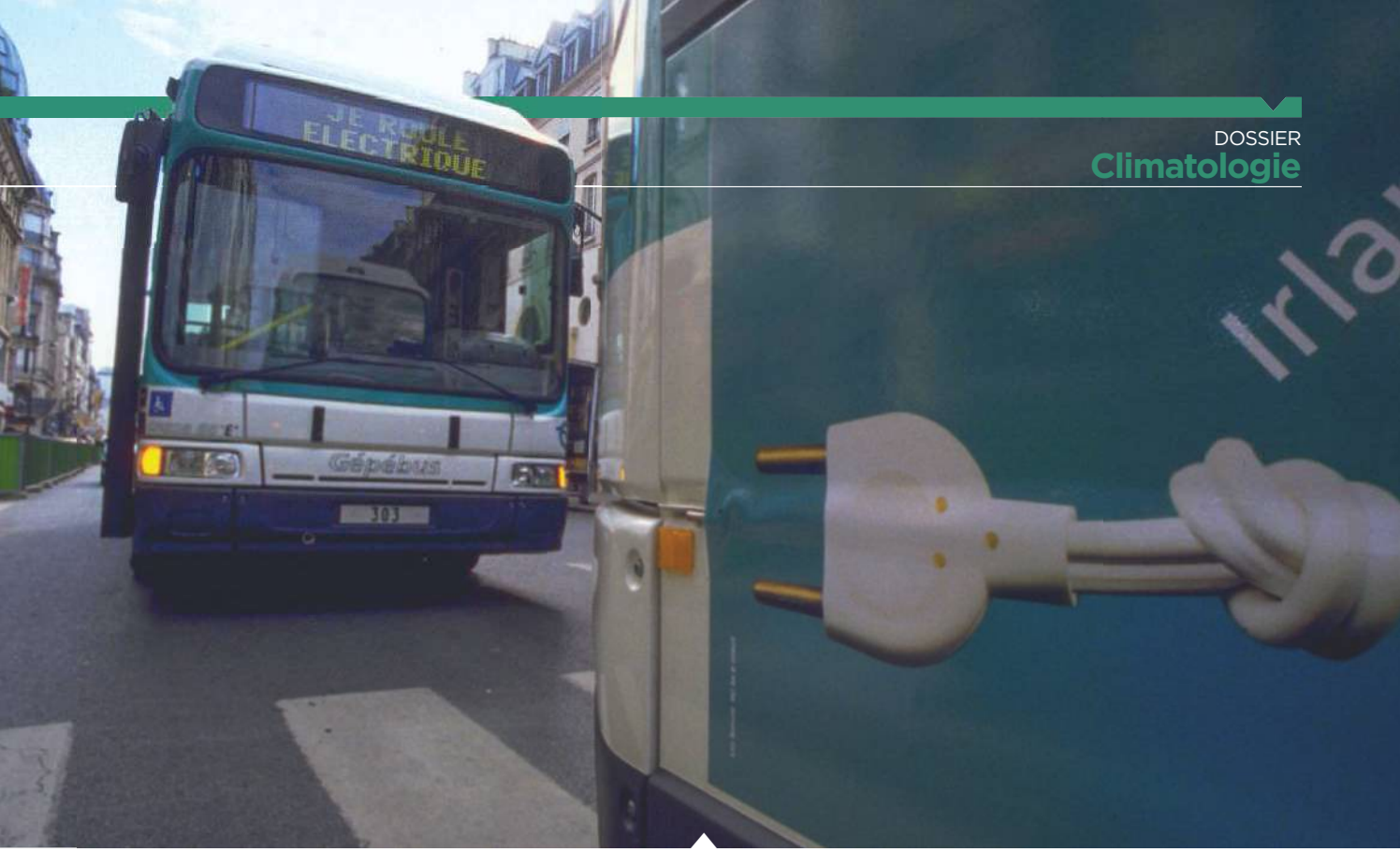
TOM CRAIG/ SAIF IMAGES

L'usage d'ampoules LED (ici à Paris) permet d'économiser jusqu'à 70 % d'énergie.

▶ Et demain ?

DES CITÉS ET BÂTIMENTS BIOMIMÉTIQUES

En Inde, la ville nouvelle de Lavasa (au sud-est de Bombay), démarrée en 2013, a été conçue pour se comporter comme une forêt tropicale humide : ses différentes infrastructures collectent et filtrent l'eau, captent l'énergie solaire, séquestrent du carbone, permettent l'évapotranspiration et favorisent le cycle de l'azote et du phosphore, analyse Janine Benyus, l'une des papesses américaines du biomimétisme. De quoi produire 35 % de son énergie, économiser 50 % de l'eau potable et éviter 70 % minimum de déchets. L'arrêt de la ville suite à une sombre affaire de corruption et un procès, ne la dissuade pas de la considérer comme une source d'inspiration : *« Quand ville et forêt seront fonctionnellement indiscernables, nous serons vraiment chez nous sur cette planète »*, estime-t-elle. Demain, les villes devront être plus productives que les terres sur lesquelles elles ont été bâties. **R. M.**



Le développement d'une flotte de bus électriques constitue un levier pour favoriser une mobilité décarbonée (ici, à Paris).

MARIO FOURMY/REA

TRANSPORTS

En chemin vers la mobilité verte

La voiture électrique à batterie reste le moyen le plus simple pour décarboner le secteur automobile. En attendant le développement industriel des véhicules à hydrogène.

Le premier vélo à hydrogène au monde est français ! L'Alpha Néo, lancé fin 2022 pour concurrencer la bicyclette à assistance électrique avec batterie *(lire aussi p. 15)*, cible le marché des collectivités qui, telles Paris, New York ou Melbourne, louent depuis une dizaine d'années, des modes de « mobilités douces partagées » parallèlement à leur offre de transports en commun. Marche, trottinette, autopartage et covoiturage s'installent aussi solidement dans les pratiques des citadins, selon l'Observatoire des mobilités émergentes, tandis que les vélos cargos — tricycles ou quadricycles — se déploient en masse dans les flottes de livreurs. La transition est en marche, alors que les voitures neuves à moteur thermique seront interdites à la vente dès 2035 en Europe. Reste qu'en France, seules 17 % des personnes vivant en zone rurale disent pouvoir choisir entre plusieurs modes de mobilité, selon l'Ademe. Et la voiture y demeure le premier recours pour les trajets quotidiens : la circulation, composée à 92 % de voitures et de véhicules utilitaires légers, connaît encore une hausse de 1,5 % chaque année, contre 2,1 % entre 1990 et 2003, selon un rapport ministériel de 2021. Pour décarboner le transport, l'option la plus viable à court terme consiste à l'électrifier.

AUTOMOBILE

Le tournant des véhicules électriques

C'est un lycéen américain de 17 ans, Robert Sansone, qui délivrera peut-être l'industrie automobile électrique d'une partie de sa dépendance aux terres rares. Récompensé en août 2022 par l'ISEF (International Science and Engineering Fair), il a mis au point un prototype de

moteur électrique dépourvu d'aimants gourmands en minerais, dont l'extraction est aussi chère que polluante. Il s'est servi d'une imprimante 3D et utilisé notamment des fils de cuivre et un rotor en acier. Le concept pourra-t-il se développer à grande échelle ? Déjà *« 2020 a été un virage vers l'électrification »*, selon plusieurs observateurs de la filière automobile. Après un démarrage assez lent entamé en 2012, (barrière du prix, manque de stations de recharge, frilosité du public), les ventes de véhicules électriques et hybrides ont explosé dans le monde industrialisé. En France, en octobre 2022, le nombre de ces voitures ou utilitaires a dépassé pour la première fois la barre du million (2,5 % du parc). La Chine domine le marché mondial avec plus de 4 millions de quatre-roues décarbonés vendus en 2022. L'Europe se trouve en deuxième position avec une voiture sur cinq en 2022, suivie des États-Unis. Deux tiers de la consommation de pétrole sont encore utilisés aujourd'hui pour faire avancer 1,4 milliard de voitures et camions thermiques dans le monde.

AÉRONAUTIQUE

L'avion vert est plus qu'un mirage

Peut-on en finir avec la « honte de voler », dénoncée par les jeunes générations ? Sur le plan des émissions de CO_2 par voyageur et par kilomètre — 45 fois supérieures à celles du TGV —, l'avion vient en tête du classement des plus polluants, pire que la voiture individuelle. Les appareils les plus récents permettent de gagner 15 à 20 % de consommation de kérosène, et donc autant d'émissions de CO_2 en moins, par rapport à la génération précédente. Mais c'est loin d'être suffisant. Aujourd'hui, les constructeurs parient sur l'hydrogène ou sur des biocarburants à base de miscanthus, une herbe qui pourrait être produite sur des terres en jachère, selon l'université d'Arizona (États-Unis). La Nasa élabore, elle, des prototypes dotés d'ailes fuselées comme les nageoires des raies manta, tandis que le Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, États-Unis) teste des avions « double bulle », équipés d'ailes plus petites ou légères grâce à trois moteurs réduits, placés à l'arrière d'un fuselage double. Avec la promesse d'une économie d'énergie substantielle, mais encore non chiffrée.

NASA AERONAUTICS

Le futur avion « double bulle » de la Nasa (illustration) promet de réduire son empreinte carbone.

MARITIME

La bataille navale du transport des marchandises

Plus de 80 % des marchandises mondiales — sur le plan du poids — circulent par les mers. Poupe réduisant la résistance, coque lubrifiée par injection de bulles d'air, structure allégée, panneaux solaires, systèmes automatisés : des améliorations permettant de réduire leur consommation d'énergie de 7 à 22 % bardent désormais les cargos anciens ou neufs dont dépendent nos approvisionnements. Des revêtements biomimétiques inspirés de la peau de requin se déploient aussi contre l'encrassement des coques par des organismes biologiques — moules, algues, cirripèdes, etc. — qui lestent les bâtiments, contrarient leur hydrodynamique et augmentent leur appétit en carburant jusqu'à 40 %. ■ **R. M.**

▶ Et demain ?

DES AUTOROUTES INTELLIGENTES POUR LES VÉHICULES AUTONOMES

Des routes solaires qui captent l'énergie et régulent le trafic de voitures autonomes et connectées en toute fluidité et sécurité. C'est le futur sur lequel planchent des dizaines de sociétés autoroutières dans le monde. Parmi elles, les Smart Highway, un projet néerlandais d'autoroutes intelligentes et interactives. Leur concept implique un marquage au sol luminescent, des peintures interactives qui réagissent à la température ambiante, une meilleure gestion de l'éclairage public et des voies prioritaires pour les véhicules électriques. Outre une amélioration de la sécurité routière, un tel projet devrait permettre d'effectuer des économies considérables en matière de signalisation.

Les herbes des prairies peuvent limiter l'érosion des sols et favoriser la biodiversité.

WIKIPEDIA COMMONS

AGRICULTURE

Les bonnes pratiques se font attendre

C'est le secteur le plus en retard dans la lutte contre le changement climatique. Pourtant des solutions existent.

L'agriculture est responsable de 20 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Ces émissions sont de trois types. Tout d'abord, les pratiques actuelles de labour profond dégagent tous les ans d'importantes quantités de CO_2 gazeux qui seraient restées dans le sol sans le passage de la charrue. Viennent ensuite les engrais chimiques et les pesticides, issus de la pétrochimie. Les engrais chimiques sont par ailleurs émetteurs de protoxydes d'azote, autre puissant gaz à effet de serre. Enfin, les machines agricoles de plus en plus puissantes, pour permettre aux agriculteurs de cultiver des surfaces de champs de plus en plus vastes, sont très gourmandes en gazole.

Aujourd'hui, l'agriculture est, avec les transports, le secteur le plus en retard dans la lutte contre le changement climatique. Pour y remédier, l'ONU, par le biais de la FAO, l'organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, pousse à des pratiques moins émissives (mais tout aussi productives). Une voie qu'emprunte également la politique agricole commune (PAC) que la Commission européenne voudrait plus verte que les objectifs timorés adoptés par les 27 États membres en 2022. Pourtant, les études scientifiques convergent vers une nécessaire transformation radicale de l'agriculture. Les marges de progrès sont en effet immenses.

▶ Et demain ?

« REBOISER » LES FONDS MARINS

Pour transformer les déserts qui rongent à 90 % les océans tropicaux et subtropicaux en pyramides alimentaires, le physicien américain Brian Von Herzen développe une technologie de permaculture marine. Des bouées équipées de GPS sont reliées à des pompes actionnées par les vagues qui restaurent la remontée d'eau froide, bloquée par le réchauffement de l'océan. Cette dernière, riche en nutriments, alimente des substrats de macroalgues et de plancton. Leur écosystème fournit nourriture, fourrage, fertilisants, fibres, matière à biocarburants et bioplastiques, et surtout un habitat pour les espèces marines, une protection côtière, un puits de carbone et une eau épurée des excès de nutriments. Des tests concluants sont menés en mer d'Arabie, dans l'océan Indien ou encore en mer de Tasman. R. M.

CULTURES

Moins de chimie, plus de diversité

Au sortir d'une Seconde Guerre mondiale qui a affamé l'Europe, la modernisation à marche forcée de l'agriculture baptisée « révolution verte » ont provoqué une hausse très importante de la production alimentaire, dont on déplore aujourd'hui le revers de la médaille. Le système agricole intensif a fortement réduit le nombre d'exploitations, augmenté la surface de celles-ci et imposé l'usage des engrais chimiques et pesticides. Dans sa stratégie « de la ferme à la fourchette », la Commission européenne, notamment par le biais de la PAC, incite à corriger cette trajectoire en imposant une réduction de 50 % de l'usage des pesticides et des intrants chimiques d'ici à 2030. Une décision confortée par la guerre en Ukraine, une grande partie des engrais provenant de Russie. Selon la PAC, la part de l'agriculture biologique doit également grimper à 25 % de la surface utile d'ici à la fin de la décennie.

Les agriculteurs sont en outre financièrement incités par l'Union européenne à adopter des mesures environnementales comme les bandes enherbées pour protéger les rivières de la pollution par les pesticides et engrais, la plantation de haies afin de favoriser la biodiversité, une rotation des cultures sur cinq ans au lieu de deux ou trois ans, avec notamment l'introduction des légumineuses (pois, fèveroles). Celles-ci ont en effet l'avantage de capter le CO_2 de l'air grâce à une symbiose avec des bactéries et ▶

donc d'enrichir naturellement les sols en carbone. L'agroforesterie, qui consiste à mêler arbres et cultures, ainsi que l'agriculture de conservation des sols, qui pratique le semis direct sur des sols non labourés, figurent également dans la panoplie à la disposition des agriculteurs.

ÉLEVAGE

Adapter la nourriture du bétail

Près de 60 % des émissions mondiales de méthane ont des causes anthropiques, et parmi les activités humaines incriminées figure pour un tiers l'élevage — principalement des 19 milliards de ruminants du cheptel mondial, puisque ce sont par leurs rots que ce gaz est émis. Cette fermentation entérique représente 2 milliards de tonnes de méthane, première source du secteur agricole. La solution la plus évidente serait une baisse du nombre d'animaux consécutive à une diminution de la consommation de viande principalement bovine *(lire p. 60)*. D'autres pistes donnent des résultats intéressants : par exemple, l'adjonction de lin dans l'alimentation entraîne une diminution de 40 % des émissions. Elle se pratique déjà en France, notamment avec le label « bleu, blanc, cœur ».

Mais le bilan de l'élevage mérite d'être nuancé. Selon la FAO, les 3,8 % d'élevages industriels émettent 80 % du méthane attribué aux ruminants domestiques dans le monde. Une étude du Cirad vient, elle, de démontrer que l'élevage sahélien est neutre en carbone du fait de l'apport en matière organique des déjections des animaux sur des sols qui ont besoin d'amendements. Par ailleurs, les herbivores sont dépendants des prairies, milieu naturel qui stocke presque autant de carbone que les forêts. ■ **L. C.**

ALIMENTATION

Mieux manger améliore l'environnement

Pour les experts, le système alimentaire mondial est à bout de souffle. Agroécologie, régime alimentaire moins carné, lutte contre le gaspillage..., les réponses sont nombreuses mais nécessitent des changements radicaux.

Non seulement le système alimentaire mondial est très inégalitaire, mais il est en plus très émetteur de gaz à effet de serre. 38 % des émissions lui sont imputables. Pire, par rétroaction, ces dernières contribuent à l'augmentation des sécheresses qui diminuent les récoltes. Selon le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), 3,3 milliards d'humains sont *« hautement vulnérables »* au changement climatique, notamment en ce qui concerne leur alimentation, d'autant que 80 % de la nourriture produite dans le monde provient de 500 millions de petites fermes très fragiles face aux aléas climatiques. Pour le programme EAT, chapeauté par la revue scientifique médicale britannique *The Lancet*, le système alimentaire mondial est tout simplement à bout de souffle. À une extrémité de la chaîne, les agriculteurs peinent à vivre de leur travail, qu'ils soient producteurs intensifs des pays développés ou petits fermiers du Sud. À l'autre extrémité, 2 milliards d'êtres humains sont obèses, 2,3 milliards n'ont pas accès à une nourriture correcte et 800 millions sont malnutris. Le déséquilibre est flagrant alors que, globalement, les seules protéines végétales pourraient nourrir une humanité trois fois plus nombreuse. La preuve : selon les statistiques de l'organisation onusienne pour

▶ Et demain ?

LA VIANDE ARTIFICIELLE ET LES INSECTES AU MENU

Cultiver *in vitro* des cellules de muscles animaux pour fabriquer de la viande artificielle est un art délicat. Des scientifiques de l'université nationale de Singapour sont parvenus récemment à en faire pousser en couches régulières, sur des échafaudages fibreux à base de prolamines (protéines) de seigle, imprimées en 3D. Coloré avec de la betterave, le produit ressemble *in fine* à de la vraie viande, selon les chercheurs qui pensent tenir un procédé répliquable à grande échelle. Y aura-t-il des amateurs ? La question se pose aussi pour les insectes : criquets, grillons et vers de farine sont déjà autorisés à la consommation humaine en Europe. Deux milliards d'humains en consomment de façon régulière et les tabous culturels pourraient sauter face à l'épuisement du système alimentaire. **R. M.**

L'agroforesterie, qui associe arbres et cultures ou élevage, permet une meilleure protection des sols et du milieu naturel. En utilisant moins de pesticides et d'engrais, la technique permet également de participer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

ALAMY/PHOTO12

l'agriculture et l'alimentation (FAO), 800 millions de tonnes d'aliments végétaux sont produits tous les ans dans le monde, dont environ la moitié correspond à des fourrages pour animaux. 270 millions de tonnes proviennent des prairies et pâturages permanents où se nourrit le bétail, soit 34 % du total. Les céréales (blé, riz, maïs) comptent pour 26 % et les oléagineux (colza, tournesol, soja) pour 17 %, le quart restant étant composé des fruits et légumes. Selon un calcul théorique, cette production représente environ 400 millions de tonnes de protéines que doivent se partager 8 milliards d'humains. Cela correspond à 50 kg annuels de protéines par Terrien, ou un peu moins de 140 grammes par jour. C'est presque trois fois les besoins d'une personne, que la FAO estime à 52,5 g par jour. CQFD. Le constat est posé. Les solutions existent. Mais elles imposent de transformer en profondeur les structures agro-industrielles actuelles.

Lors de la COP27 sur le climat, qui s'est déroulée en Égypte en novembre 2022, la FAO a présenté son plan pour réduire les émissions de gaz à effet de serre du secteur. Il s'appuie sur trois programmes. Le premier, c'est la transformation de l'agriculture et sa mutation vers des systèmes plus résilients d'agroécologie, avec la réduction de l'emploi des engrais chimiques et des pesticides, la diversification des productions, la lutte par biocontrôle contre les ravageurs. La FAO plaide notamment pour que les sommes consacrées à la lutte contre le changement climatique, qui servent essentiellement les secteurs des énergies renouvelables, soient en partie réorientées vers l'agriculture. La seconde étape, en coordination avec l'Organisation mondiale de la santé (OMS), est la conversion des circuits actuels de transformation et de commercialisation vers des systèmes de distribution axés sur la diffusion de produits sains et bons pour la santé. La troisième initiative porte sur une meilleure gestion de la ressource en eau et la fin des gaspillages.

Les chercheurs réunis au sein du EAT-Lancet complètent cette stratégie par

une série de recommandations : un engagement international qui se traduit au niveau des États par une transition vers une alimentation saine, une réorientation des politiques agricoles vers une production de qualité plutôt que de quantité, une nouvelle révolution agricole qui reposerait cette fois non plus seulement sur les rendements mais sur l'application des techniques agronomiques de pointe économes en intrants, l'engagement international de stopper l'extension des terres agricoles, et donc la destruction des milieux naturels, et enfin la réduction de moitié du gaspillage actuel.

THOMAS LOUAPRE/ DIVERGENCE

L'équivalent de 150 kg de nourriture par personne et par an est gaspillé en France (ici, collecte d'invendus d'un supermarché pour une association caritative, près de Nantes).

NUTRITION

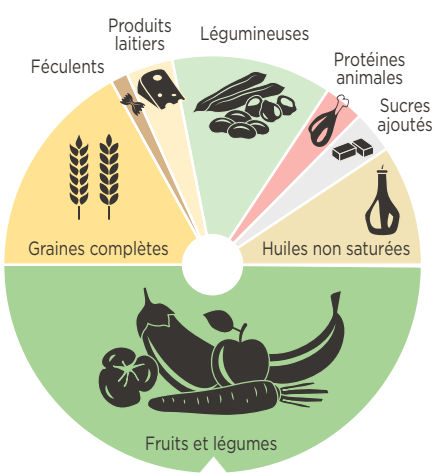
Une nourriture moins carnée

L'affaire est entendue : une alimentation basée sur les plantes est moins émettrice de gaz à effet de serre qu'un régime carné. L'Agence de la transition écologique (Ademe) s'est penchée sur l'assiette des Français. Selon elle, *« les consommations d'énergie par personne varient de 8492 mégajoules (MJ) par an pour le régime viande à 170 grammes par jour, à 4372 MJ pour le régime végétalien, soit un rapport de 1 à 2 »*. Ce rapport passe de 1 à 6 pour les émissions de gaz à effet de serre associées à ces deux régimes, qui varient donc de 1900 kg de CO_2 pour le régime carné à 315 kg pour le végétalien. Les chercheurs traduisent ces valeurs en surface nécessaire pour nourrir une personne. Un régime à 170 g de viande nécessite 5200 m² de surface agricole, contre 1200 m² pour le régime végétalien. Mais passer de 170 g de viande à 75 g fait diviser la surface par deux.

Pour se nourrir, les Français ont actuellement besoin de 26 millions d'hectares. On aurait tort d'en conclure pour autant que le pays a son indépendance alimentaire grâce à sa surface agricole utile de 28,5 millions d'hectares. En réalité, 37 % sont situés hors de métropole. L'indépendance n'est pas possible pour des produits comme le café ou le cacao, mais elle l'est pour des aliments comme le soja, dont la culture en Amérique latine génère de vastes déforestations.

La « révolution verte » s'est accompagnée d'une multiplication des échanges de produits agricoles. Selon la FAO, ce commerce mondial des denrées a plus que doublé depuis 1995 pour atteindre 1500 milliards d'euros en 2018. La reconquête de la souveraineté alimentaire va impliquer de réduire drastiquement ces échanges.

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : EAT



L'assiette idéale doit comporter pour moitié des fruits et légumes.

SURPRODUCTION

Lutter contre le gaspillage

Chaque année dans le monde, un tiers de la production alimentaire est jeté. En France, le gaspillage pèse 20 % des achats alimentaires, soit par destruction des invendus, soit par négligence des consommateurs. L'équivalent de 150 kg de nourriture par personne et par an. De façon plus globale, les causes se retrouvent tout au long de la chaîne de distribution. Dans les pays du Sud principalement, l'absence de transports et les failles de la chaîne de froid font que près de la moitié de la production reste au bord des champs.

Dans les pays développés, l'hyperconsommation, la débauche d'emballages — générant des gabegies de plastique notamment — et les mauvaises habitudes des consommateurs sont à l'origine de ce désastre écologique et social. Selon les chercheurs du EAT-Lancet, des solutions technologiques de traçabilité tout au long de la chaîne de fabrication et de distribution, des politiques publiques de lutte contre le gaspillage et l'éducation des consommateurs doivent permettre de réduire de moitié les pertes d'ici à la fin de la décennie. C'est d'ailleurs l'un des 17 objectifs de développement durable (ODD) adoptés

par les 195 États membres de l'ONU en 2015. En France, l'objectif est de réduire de moitié les déchets dans la distribution alimentaire et la restauration collective d'ici à 2025 et chez les particuliers d'ici à 2030.

BIO

Consolider et développer le local

L'agriculture biologique est une des solutions avancées par le Giec et la FAO pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Elle est moins émettrice que le secteur conventionnel car elle utilise moins de machines, plus du tout d'engrais chimiques ni de pesticides, consommateurs d'énergies fossiles. En France, 53 % de la consommation en pétrole et en gaz d'une exploitation concerne les carburants, 47 % les engrais et pesticides. Mais la question est loin de faire consensus si l'on considère les rendements obtenus. De nombreuses études affirment que le bilan du bio n'est pas si bon du fait d'un moindre rendement qui impose plus de surface pour une production équivalente. Un calcul contesté par d'autres recherches académiques qui avancent que cette différence de performance s'efface au cours du temps avec l'amélioration des pratiques et l'expérience de l'agriculteur. La polémique n'est pas tranchée.

Le « manger local » présente le principal avantage de dynamiser le secteur économique de proximité tout en favorisant une alimentation saine. Et les transports sont raccourcis tant pour la marchandise que pour le consommateur. Mais l'impact est mesuré : les transports ne représentent que 13 % des émissions de la production d'un produit, 67 % provenant du mode d'agriculture (et 20 % de la transformation et la cuisson). ■ **L. C.** @Loic_Chauveau

MATÉRIAUX

Une matière première à valoriser

L'innovation technologique et la montée en puissance du recyclage vont permettre de réduire l'empreinte carbone de ce secteur.

Faire mieux avec moins de carbone, considérer les déchets comme une matière première : la société du XXIe siècle commence à concevoir et à réimaginer les matériaux utilisés dans les produits et les structures, ainsi que les moyens d'en réduire la quantité, de les réutiliser et de les recycler. Ce qui n'exclut pas des innovations high-tech.

PLASTIQUE

Des sacs recyclables ou compostables

En 2017, une étude de l'université de Californie (États-Unis) calculait que sur les 8,3 milliards de tonnes de plastiques produites depuis 1950, 5,8 milliards avaient été jetées, 500 000 recyclées et 700 000 incinérées. Cela laisse 4,6 milliards de tonnes quelque part dans la nature, et notamment dans les océans. Le plastique traditionnel, qui absorbe 7 % de la production mondiale de pétrole, est omniprésent dans nos vies, des textiles aux ordinateurs en passant par les meubles, les voitures et les stades de football. Mais le plus gros de son utilisation est celui des emballages, souvent à usage unique. Selon différents experts, on pourrait fabriquer 90 % du plastique à partir de plantes ou de matières premières renouvelables. Avec de la cellulose, de l'amidon, de l'huile de ricin, de la chitine présente dans les exosquelettes des crustacés, des cannes à sucre, des algues, des cultures de micro-organismes hors-sol, etc. Les plus intéressants pour réduire les émissions et capter du carbone sont les bioplastiques tirés de la biomasse résiduelle, comme celle qui reste après la production de pâte à papier ou de biocarburant. Attention, les plastiques d'origine végétale, réa-

SPL/SUCRE SALÉ

Les bioplastiques bactériens (PHA) connaissent un intérêt grandissant de la part des industriels.

lisés à partir de biomasse, ne sont pas tous biodégradables, tels les sacs de course en polyéthylène (PE) fabriqués à partir de canne à sucre et de maïs. En revanche, l'acide polylactique (PLA) des gobelets jetables et les polyhydroxyalcanoates (PHA) — produits naturellement par fermentation bactérienne de sucres ou de lipides et qui font d'excellents fils de suture — le sont. Les innovations pour ces matériaux sont multiples et de grosses sociétés comme DuPont ou BASF s'y lancent. Toutefois, le plus grand défi sera de veiller à ce que de véritables filières de recyclage ou de compostage soient mises en place.

RÉFRIGÉRANTS

Remplacer les fluides frigorigènes

C'est peut-être l'une des découvertes du siècle. Des chercheurs du Laboratoire national Lawrence Berkeley (États-Unis) ont décrit le 23 décembre 2022 dans *Science* une nouvelle méthode de chauffage et de refroidissement, dite ionocalorique. Très schématiquement, ils ont *« manipulé des ions d'iode et de sodium, ainsi que du carbonate d'éthylène (un solvant issu du CO_2) pour alterner des états liquide et solide et tirer parti de la façon dont l'énergie est stockée ou libérée lorsqu'un matériau change de phase (comme lorsque l'eau devient glace)* », explique le spécialiste de génie mécanique Drew Lilley, premier auteur de l'article. Leur procédé pourrait remplacer les fluides frigorigènes HFC, pour hydrofluorocarbures, dont l'élimination est, selon le diplomate américain John Kerry, *« la chose la plus importante qu'on puisse faire en une étape pour le climat »* et, pour l'environnementaliste Paul Hawken *(lire p. 46), « la première solution au monde pour inverser le cours du réchauffement »*.

C'est que chaque réfrigérateur, chaque rayon frais de supermarché, chaque climatiseur utilisent un système calorifique pour faire passer les fluides frigorigènes de l'état gazeux à l'état liquide et que ces HFC peuvent réchauffer, selon leur composition, de 1000 à 9000 fois plus l'atmosphère que le CO_2. Ils sont à l'origine d'émissions tout au long de leur vie, au moment de la production, du remplissage, en service, lorsqu'ils fuient…, mais c'est à la fin qu'ils font le plus de dégâts, relarguant 90 % de leurs gaz à effet de serre. Les émissions augmentaient de 10 à 15 % par an notamment avec la généralisation de la climatisation, alertaient les spécialistes il y a une quinzaine d'années, et la tendance ne va pas s'inverser avant des années. C'est pourquoi 170 pays ont signé en 2016 l'amendement de Kigali (Rwanda), échelonnant l'interdiction de ces produits jusqu'en 2030. Cet accord est venu compléter le protocole de Montréal (Canada) de 1987, qui a déjà permis l'interdiction de leurs cousins, les CFC (chlorofluorocarbures) et les HCFC (hydrochloro-fluorocarbures), destructeurs de la couche d'ozone. Le Berkeley Lab n'est pas le seul à se pencher sur le problème, et des techniques sont à l'essai, utilisant le magnétisme, la pression, l'étirement et les champs électriques pour manipuler des matériaux afin qu'ils absorbent ou libèrent de la chaleur. D'autres scientifiques se concentrent sur la façon de récupérer, purifier et transformer ces fluides fluorés en produits chimiques inoffensifs mais réutilisables. Des substituts sont déjà sur le marché, notamment des réfrigérants naturels comme le propane et l'ammoniac.

SPL/SUCRE SALÉ

Utilisés dans les systèmes de climatisation qui ne cessent de s'étendre dans le monde, les fluides frigorigènes HFC contribuent de manière élevée à l'effet de serre.

CIMENT

Des procédés de fabrication alternatifs

Fabriquer une tonne de ciment traditionnel génère entre 600 kg et 800 kg de CO_2 selon la modernité de l'usine. Ce liant, utilisé dans la fabrication des briques, bétons, murs, etc., produit au rythme de 4,6 milliards de tonnes mondiales par an, est responsable de 7 % des émissions anthropiques annuelles, trois fois plus que le transport aérien, admet l'Association mondiale du ciment et du béton (GCCA). Le dégagement de gaz à effet de serre est inhérent au processus de la cuisson à 1 450 °C d'un mélange d'argile aluminosilicate et de calcaire, afin de fabriquer des nodules appelés clinkers, constituant principal du ciment. Il pèse pour 70 % des émissions du secteur du ciment, les 30 % restants étant issus de la consommation d'énergie du four lui-même. Bien sûr, on peut recourir à des fours électriques ou chauffés à la biomasse *(lire p. 50)*, mais le défi principal est de changer la composition du ciment. Des essais sont menés pour remplacer le clinker par des matériaux alternatifs comme la cendre volcanique, et des résidus industriels comme le laitier de haut-fourneau, un sous-produit de la fabrication de l'acier qui a d'ailleurs été utilisé dans la construction du métro de Paris. *« Une piste prometteuse est celle du ciment à l'argile calcinée et au calcaire (ou LC3, pour Limestone Calcined Clay Cement),* explique Paul Fennell, spécialiste de l'énergie propre à l'Imperial College de Londres (Royaume-Uni) dans *Nature. Le mélange d'argile et de calcaire peut remplacer jusqu'à la moitié du clinker tout en conservant des propriétés similaires à celles du ciment ordinaire. Facile à fabriquer et à utiliser, le ciment LC3 est sur le point d'être commercialisé. Certaines entreprises l'incluent déjà dans leurs stratégies vers la neutralité carbone, parmi lesquelles la société française Lafarge-Holcim et l'allemand Heidelberg Cement.* » Le nec plus ultra, enfin, consistera à capturer et stocker le CO_2 émis par les sites de production. Peut-être en l'injectant dans le béton, ce qui pourrait rendre le matériau plus résistant. Une piste sur laquelle travaillent des Canadiens.

PERROT OLIVIER/SIPA

Le ciment LC3 génère lors de sa production jusqu'à 30 % de CO_2 en moins que le ciment classique.

VITRAGE

Performance et isolation

Aujourd'hui, les fenêtres les plus performantes ne sont pas seulement parfaitement isolantes : elles réagissent à la météo en temps réel, comme dans le film *Blade Runner* de 1982. C'est le cas des vitrages électrochromiques, qui contiennent une couche ultramince de nano-oxydes métalliques, dont les ions se déplacent lorsqu'ils sont soumis à une brève charge électrique, et modifient la teinte et la réflexivité du verre. Naturellement, ils peuvent être reliés à des outils de gestion domotique, un smartphone, un thermostat intelligent. Ces vitres peuvent laisser entrer la lumière tout en bloquant la chaleur. Ou réfléchir les deux pour plonger la pièce dans l'obscurité : plus besoin de volets ! Technologie apparentée, le vitrage thermochromique fonctionne, lui, sans électricité. Il passe d'un état opaque à transparent en fonction de la température extérieure. Quant aux fenêtres photochromiques, elles se teintent selon l'exposition à la lumière, tout comme certains verres de lunette. Ces trois technologies permettent de réduire les besoins en éclairage, en chauffage et en climatisation. Le vitrage électrochromique est le plus souple et le plus performant des trois (jusqu'à 20 à 30 % d'économie énergétique pour les modèles les plus récents), mais reste 50 % plus cher qu'un vitrage classique. Il pourrait se généraliser et se démocratiser d'ici à 2050 dans les pays industrialisés les plus chauds ou les bâtiments aux façades très exposées au soleil. ■ **R. M.**

@RachelFleaux

▶ Et demain ?

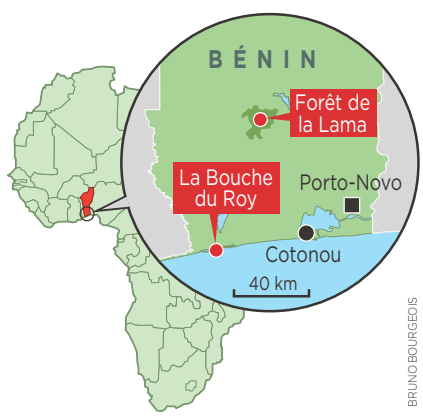
LA MÉTÉORISATION AUGMENTÉE DES MINÉRAUX

Les forêts ou les océans ne sont pas les seuls puits terrestres de carbone. Depuis des milliards d'années, les minéraux ont eux aussi capté des milliards de tonnes de CO_2. La météorisation naturelle des roches, c'est-à-dire leur dégradation par des agents atmosphériques, permet d'extraire près d'un milliard de tonnes de ces gaz à effet de serre par an. Certaines roches silicatées, dégradées par l'acidité du CO_2 puis lessivées, transforment en effet le CO_2 en carbonates inorganiques, qui finissent par se retrouver dans les fleuves ou les océans et par devenir du carbonate de calcium. Une idée consisterait à extraire et broyer ces roches — en particulier l'olivine — et à en saupoudrer stratégiquement quelques terres agricoles, plages, eaux peu profondes. Des tests ont été effectués en Islande et aux États-Unis, mais seulement dans des grottes de basalte. **R. M.**

Les populations locales, gardiennes de la biodiversité

Nombre d'ONG et de chercheurs en écologie en sont venus à un constat simple : la défense de l'environnement passe d'abord par l'implication des populations locales, les premières concernées par la déforestation et la raréfaction de la faune sauvage. Au Bénin, les savoirs et cultures autochtones sont mis à l'honneur. Et quand cela ne suffit pas, les dieux vaudous sont invoqués. Reportage.

Au Bénin, la nature est sacrée. Veillée par les dieux vaudous. Leur pouvoir invisible suspend les machettes voulant couper les branches des afzelias dans les derniers lambeaux de forêts tropicales, et celles des palétuviers dans les ultimes mangroves de la côte du golfe de Guinée. La religion animiste a fait ainsi parler d'elle dans les couloirs de la COP15, qui a réuni en décembre dernier à Montréal (Canada) les 195 États signataires de la Convention internationale sur la diversité biologique *(lire p.66)*. Deux constats ont fait l'unanimité : aucune protection ne peut se faire sans que les populations locales en tirent bénéfice ; et les savoirs et cultures autochtones sont bien les plus efficaces pour préserver la nature. Le sud du Bénin est une plaine agricole d'où la nature est désormais presque exclue. *« Nous comptons environ 3000 reliques de la forêt tropicale, qui recouvrait autrefois l'ensemble du sud du pays et ne représente plus aujourd'hui que 2 % de la surface,* déplore Augustin Orou Matilo, coordonnateur de la petite équipe de négociateurs béninois à la COP15. *Elles sont toutes sacrées et c'est ce statut qui les sauve.* » Augustin Orou Matilo était présent à Nagoya (Japon) en 2010 quand l'ensemble des nations a adopté l'objectif de stopper l'érosion de la biodiversité en 2020. La communauté internationale a échoué, tout comme le Bénin. Le négociateur chevronné est certain que cette fois est la bonne. *« Un diagnostic scientifique solide de l'état de la biodiversité béninoise a été établi par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) en 2016 et une loi de 2017 empêche désormais d'exploiter les dernières zones naturelles. Nous pouvons donc établir un plan d'action sérieux pour respecter les objectifs de 2030* », estime Augustin Orou Matilo, qui glisse un conseil : *« Allez à la Bouche*



BRUNO BOURGEOIS

YANICK FOLLY / AFP

Des programmes ont été mis en place au Bénin afin d'éduquer notamment les forestiers et les agriculteurs à une gestion durable des ressources naturelles (ici un camp d'entraînement intensif pour former les jeunes à l'agroécologie).

du Roy. » La Bouche du Roy n'est pas un milieu anodin. Baptisée ainsi vraisemblablement par les explorateurs portugais, cette embouchure du fleuve Mono est barrée par une langue de sable de 200 mètres de large. Derrière cette protection s'étendent 10 000 hectares de marais, de forêts, de mangroves. C'est le royaume du lamantin d'Afrique, de la tortue olivâtre, des aigrettes ardoisées.

En 2014, Jean-Baptiste Lokossou, chef d'un des 17 villages de l'embouchure, s'est inquiété. *« Je ne voyais plus de poissons-grenouilles qui arrivent à vivre à l'air libre dans la vase,* raconte-t-il. *Je me suis dit : la nature s'échappe.* » La raréfaction des *periophtalmus* coïncide avec une baisse drastique des prises des pêcheurs. *« Comme les poissons étaient plus petits, le réflexe a été de réduire encore la maille des filets et donc de prendre encore plus de juvéniles qui ne pouvaient se reproduire »*, relate Moïse Koumassa, ingénieur écologue à l'association de protection de la nature Eco-Bénin.

JEAN-BAPTISTE LOKOSSOU

« Je ne voyais plus de poissons-grenouilles qui arrivent à vivre à l'air libre dans la vase. Je me suis dit : la nature s'échappe »

Jean-Baptiste Lokossou, chef d'un des 17 villages de l'embouchure du fleuve Mono et président de Doukpo

La surface des mangroves a diminué de 43 % en 25 ans

La principale cause de cet effondrement est évidente. Les poissons et les coquillages disparaissent parce que les palétuviers de la mangrove où ils fraient sont coupés pour fournir du bois de chauffage, seule énergie à disposition des habitants pour faire bouillir l'eau et cuire les aliments. Selon les chiffres de l'UICN, la surface des mangroves béninoises a diminué de 43 % entre 1980 et 2005. Depuis, les destructions ont ralenti et

YANICK FOLLY / AFP

Des habitants du village d'Alango accrochent aux branches de palétuviers des représentations de Zangbéto, divinité vaudoue protectrice de la mangrove.

des restaurations ont permis de reconquérir quelques espaces. Mais la santé de ces écosystèmes n'est pas bonne car ils sont toujours surexploités. La population du Bénin va compter 15 millions d'habitants cette année, contre moins de 2 millions en 1970, et ses besoins en énergie n'ont pas été anticipés. Les Béninois affrontent ainsi une situation trop banale : dans le monde, 2 milliards d'humains dépendent de la biomasse pour leurs besoins essentiels et doivent donc exploiter les arbres à leur disposition, accélérant la déforestation. Au Bénin, les chefs des 17 villages du cœur de la mangrove ont décidé de fonder une « aire communautaire de conservation de la biodiversité » baptisée Doukpo, qui signifie « manger mais laisser ». *« Il fallait faire comprendre qu'on ne pouvait pas continuer à exploiter la mer et les terres sans se préoccuper de l'avenir,* expose Jean-Baptiste Lokossou, président de Doukpo. *C'est difficile car ici les gens sont pauvres et trouver à manger tous les jours n'est pas évident.* »
Ces efforts coïncident avec le classement par l'Unesco en 2016 de la Bouche du Roy en réserve de biosphère. *« Nous avons pu ainsi entreprendre un diagnostic scientifique des richesses écologiques de la réserve et procéder à un zonage entre un cœur à préserver totalement et des zones tampons où les activités sont possibles mais réglementées »*, poursuit Moïse Koumassa. Taille des mailles des filets, lagunes sans pêche, interdiction de coupes de bois, autant de dispositions difficiles à faire respecter. L'État béninois n'a en effet pas les moyens de payer des gardes assermentés. C'est d'ailleurs l'une des raisons de l'échec de nombre de réserves naturelles dans le monde. Selon l'UICN, moins d'un quart des aires protégées ont des ressources humaines suffisantes pour assurer une protection efficace contre le braconnage.

Un fétiche pour marquer les lieux protégés

Le Bénin a cependant une chance. C'est la terre d'origine du vaudou. Cette religion animiste compte un panthéon de plus de 400 divinités ou esprits habitant les composants, vivants ou non, de la nature. Si la plupart des habitants de l'ancien Dahomey (Bénin et Togo) sont aujourd'hui catholiques ou musulmans, ils n'ont pas pour autant abandonné le vaudou qui reste un guide spirituel. Et à la Bouche du Roy, c'est Zangbéto, « le gardien de la nuit », qui protège 500 hectares de mangroves. *« Celui qui brave*

BIODIVERSITÉ

COP15 : un engagement fort mais à concrétiser

Un accord historique. Mais qu'il faudra accomplir. C'est en résumé le sentiment général exprimé lors du coup de marteau final de la COP15, le 19 décembre dernier à Montréal (Canada). Sur une planète où 75 % de la surface émergée a été modifiée par l'humain, l'engagement de préserver 30 % des terres et 30 % des mers de toute action destructrice constitue un acte fort. Mais la force de l'accord, c'est d'obliger aussi à agir sur les 70 % restants.

Les quatre objectifs et les 23 cibles adoptés portent également sur l'utilisation durable des ressources, la réduction des pollutions, la lutte contre les espèces invasives, le partage équitable des bénéfices tirés de la nature.
Les risques induits par l'usage des pesticides et les engrais chimiques devront être réduits de 50 % d'ici à 2030. Les stocks surexploités de poissons et les espèces sauvages trop convoitées devront être gérés durablement et les subventions qui vont à l'encontre de ces objectifs (comme la détaxation des carburants) devront être progressivement éliminées. Ces buts ambitieux seront-ils respectés ? Les États se sont dotés d'un système de mesure de l'efficacité des actions entreprises, de rapportage auprès de l'ONU et de vérification sur le terrain de la réalité des plans de restauration entrepris. D'ici à deux ans, tous les États devront avoir établi une stratégie nationale de la biodiversité. L'action pourra commencer.

les divinités risque de perdre beaucoup d'argent ou, pire, de mourir », assure Jean-Baptiste Lokossou. Depuis une cérémonie officielle très médiatisée pour que personne n'ignore la démarche, un fétiche marque les lieux protégés. *« Et ça marche : plus personne ne coupe et les mangroves n'arrêtent pas de prendre de l'épaisseur* », se réjouit Moïse Koumassa qui, avec Eco-Bénin, espère pouvoir augmenter les surfaces protégées au fur et à mesure que les plantations d'acacias et les foyers améliorés diminueront les besoins en bois.

Une gestion collective fondée sur la responsabilité de chacun

À l'intérieur des terres, les derniers lambeaux de forêt équatoriale sont eux aussi sacrés. Mais c'est la coopération des populations riveraines qui est recherchée. Avec ses 4000 hectares, la forêt de la Lama est le vestige le plus important de l'ancienne forêt équatoriale. Les écologues de l'UICN y ont répertorié des essences locales anciennes comme *Afzelia africana, Albizia ferruginea, Gardenia imperialis,* qui culminent à plus de 30 mètres de hauteur. Depuis 2017, la loi béninoise interdit toute exploitation et exportation de bois d'œuvre et de charbon de bois provenant des 3000 reliques de forêts dont la superficie totale atteint 18 000 hectares. *« Avant, chacun rentrait dans la forêt et se servait comme il voulait,* reconnaît Wagble Bernadin, un agriculteur riverain. *Aujourd'hui, on protège. Et comme nous sommes les seuls à être présents en permanence, la lutte contre les incendies est de notre responsabilité.* » Si les riverains ont changé de comportement, c'est à cause du teck. Des milliers d'hectares de cette essence ont été plantés par des centaines de petits ou gros planteurs. L'Office national du bois du Bénin (Onab, l'équivalent de l'ONF en France) a ainsi décidé d'en planter lui aussi. Mais en mettant en place un système commun de concertation et de gestion avec les 15 villages riverains. *« Cette essence met trente ans pour arriver à sa maturité,* explique Ibrahim Djabarou, responsable des plantations à l'Onab. *Entre-temps, il faut régulièrement couper les branches adventices pour garder un tronc droit. C'est le travail des riverains, qui peuvent ensuite emporter les branches qui sont vendues comme bois énergie.* » Pour gérer ce nouveau revenu, les agriculteurs ont dû mettre sur pied une organisation collective. *« Chaque village a créé son comité de gestion chargé de partager les parcelles qui lui sont attribuées, de répartir les revenus et de décider de l'utilisation d'une part au développement de la communauté* », précise Wagble Bernadin, qui préside le comité de son village. *Nous vivons mieux grâce aux fagots, mais nous avons pu aussi dégager de l'argent pour améliorer l'école et réaliser des infrastructures de santé.* » En retour, les riverains s'investissent dans la surveillance et la protection de la forêt naturelle. Des milliers d'yeux vérifient quotidiennement qu'elle reste bien inviolée. Avec l'aide des dieux vaudous. ■

Loïc Chauveau @Loïc_Chauveau

COOPÉRATION ET GESTION DES ÉCOSYSTÈMES

Trois exemples d'actions réussies

AMAZONIE

Comment instaurer le dialogue entre les gros éleveurs et les petits paysans ? Les uns exploitent et déforestent sans se soucier de pérenniser leur activité, puisqu'ils partiront ailleurs quand les terres seront épuisées. Les autres veulent conserver des moyens de subsistance qui leur permettront de sortir de la pauvreté. Au Pérou et au Brésil, le projet TerrAmaz veut concilier ces positions antagonistes en démontrant scientifiquement que les uns ont besoin des autres. La petite agriculture protège en effet une diversité naturelle propice au renouvellement des sols, dont les grandes propriétés peuvent tirer profit pour la restauration de leurs terres.

BANGLADESH

Les herbiers marins et les mangroves sont les puits de carbone les plus puissants de la planète. L'inscription au patrimoine mondial de l'Unesco des 140 000 hectares de la plus grande mangrove au monde, à l'estuaire du Gange, a permis de stopper la dégradation d'un écosystème capteur de CO_2, riche en espèces rares — dont le tigre du Bengale — et essentiel pour préserver les populations locales de la montée du niveau des mers. Mais la restauration du lieu a également augmenté les revenus des coupeurs de bois, collecteurs de miel et pêcheurs, grâce à un écosystème qui a retrouvé sa productivité.

FRANCE

Le programme MixFoChange promeut la diversité des plantations forestières, alors que 95 % des forêts plantées dans le monde n'abritent qu'une seule espèce. Dans les Landes, les chercheurs évaluent les apports d'une forêt plus diverse en matière de résistance à la sécheresse et de productivité. Les premiers résultats montrent que le pin traditionnel de ce massif souffre moins du manque d'eau quand il est associé au chêne vert et au bouleau. Mieux : ce dernier constitue un repoussoir efficace contre les insectes qui affectent la santé des pins. Les forêts industrielles seraient vraisemblablement plus résistantes si elles faisaient place à la diversité.

JUSTIN YAU/ SIPA USA

À l'hôpital militaire de Lyman (Ukraine), les médecins évaluent le degré de gravité des blessures des patients et prodiguent les soins d'urgence vitale aux personnes les plus gravement atteintes afin de stabiliser leur état de santé avant de les évacuer.

Médecine de guerre

Innover pour sauver des vies

Un an après le début du conflit en Ukraine, comment chirurgiens et réanimateurs opèrent-ils sur le terrain ? La médecine de guerre, une discipline qui obéit à des protocoles très particuliers, bénéficie désormais d'équipements à la pointe de la technologie et de formations inédites. Revue de détail.

Par Coralie Lemke @CoralieLemke

Kharkhiv, à 30 kilomètres de la frontière avec la Russie et à quelques pas des lignes de front. Dans l'abri anti-bombes de la cave de leur hôtel, le Pr Raphaël Pitti et le Dr Pierre Catoire forment des médecins à l'échographie d'urgence. La veille, les deux formateurs français de l'ONG Mehad avaient installé leur matériel dans une salle de l'hôtel, mais les alertes à la bombe incessantes les ont forcés à dispenser leurs cours dans le sous-sol de l'établissement. Durant deux jours d'octobre 2022, 12 soignants ukrainiens — cardiologues, chirurgiens urgentistes, anesthésistes-réanimateurs — vont être formés à l'utilisation sur le champ de bataille d'une nouvelle génération d'échographes.

L'objet pèse 90 grammes, tient dans une poche et comprend deux sondes, une pour le thorax et l'autre pour le cœur. La sonde est reliée en Wi-Fi à un smartphone. En un coup de main, le médecin peut dégainer l'outil et ausculter un blessé. « *Lorsqu'un malade se plaint de fortes douleurs dans le thorax, il faut savoir s'il souffre d'un épanchement sanguin ou si ce sont simplement ses fibres musculaires qui sont douloureuses — ce qui ne relève pas d'une urgence sur un terrain de guerre — pour éviter des opérations inutiles* », explique Raphaël Pitti, professeur agrégé en médecine d'urgence et de catastrophe, et responsable des formations à l'ONG Mehad. Avec l'échographie portative, il est possible de voir en un clin d'œil ce qui se passe dans l'abdomen. S'il ne contient pas de sang, le médecin peut se concentrer sur un autre blessé.

L'innovation, à laquelle les 12 soignants formeront à leur tour leurs collègues, est donc poten-

PREMIERS SOINS

La réanimation au cœur de la prise en charge

Secourir un blessé qui vient d'être touché est une chose. Mais garantir qu'il va survivre lors des soins les semaines suivantes a longtemps été un challenge en médecine de guerre. *« On ne comprenait pas pourquoi une personne qu'on pensait avoir sauvée se dégradait rapidement trois semaines plus tard avant de mourir d'une défaillance multiviscérale, alors que l'on pensait avoir fait tout ce qu'il fallait »*, se remémore le Pr Raphaël Pitti, formateur à l'ONG Mehad. À cette question, la médecine de guerre moderne a une réponse : l'hypoxie. Cette défaillance est un processus physiopathologique lié à la période durant laquelle le blessé est resté avec un apport insuffisant en oxygène et en hypotension. *« Plus la période est longue et plus cela entraîne un syndrome inflammatoire, aggravé par une potentielle hypothermie,* souligne le spécialiste de la médecine d'urgence. *Ces processus inflammatoires vont provoquer une coagulation disséminée dans les vaisseaux et boucher les capillaires sanguins.* » Désormais, les soignants luttent dès le début contre le manque d'oxygène, l'hypotension et l'hypothermie. *« La priorité est de réanimer le blessé. S'il présente des lésions intestinales, on coupe les morceaux détruits, on nettoie l'intestin, on arrête l'hémorragie avec des clamps et des compresses. Le patient est maintenu endormi, transfusé, stabilisé, réchauffé. Ensuite seulement, on va procéder à la chirurgie. Elle a une tout autre place qu'à l'hôpital traditionnellement.* »
En médecine de guerre, la place de la réanimation a transformé la prise en charge.

tiellement cruciale pour la première mission du médecin sur un terrain de guerre : hiérarchiser les priorités pour sauver le plus de vies possible. *« Quand les blessés arrivent en nombre, il faut avoir un processus quasi algorithmique pour trier les malades, connaître les délais de prise en charge et les stabiliser,* poursuit le médecin qui est intervenu durant dix ans en Syrie avant d'aller en Ukraine. *L'idée est de distinguer ce qui est urgent de ce qui ne l'est pas et d'identifier les personnes qu'on ne peut pas réanimer car leurs blessures sont trop importantes.* »

Limiter les dommages pour que le patient reste en vie

Ce processus a largement évolué au cours de l'histoire, au fil des progrès techniques et des connaissances de l'organisme toujours plus complètes. *« Pendant les deux guerres mondiales, on procédait surtout à de la chirurgie sur les champs de bataille en opérant sur place. Puis, au moment de la guerre en Algérie et de celle du Viêt Nam, est apparu le transport en hélicoptère. C'est là qu'est né le* pick and run, *c'est-à-dire le fait d'évacuer rapidement le blessé pour s'en occuper loin du front. C'est une mentalité assez américaine. Les Français, eux, étaient plutôt dans une stratégie de stabiliser sur place avant d'évacuer le blessé* », explique Raphaël Pitti. Aujourd'hui, le *damage control* est devenu le maître mot : les médecins cherchent avant tout à limiter les dommages pour que le patient reste en vie. Ils stabilisent son état en veillant en particulier à éviter l'hypoxie *(lire l'encadré ci-dessus)*. La chirurgie n'intervient qu'ensuite, si elle est nécessaire.
Si celle-ci ne se pratique quasiment plus sur le champ de bataille, le manque

TERRAIN

Travailler dans un contexte agité et sans cesse mouvant

La médecine de guerre a un statut particulier au sein des médecines de catastrophe. *« Les catastrophes naturelles amènent à soigner des noyés et des polytraumatisés. Les catastrophes industrielles entraînent des explosions mais aussi une toxicité. Enfin, il y a les catastrophes humaines comme un stade qui s'effondre ou une panique de foule »*, explique le Pr Raphaël Pitti, professeur agrégé en médecine d'urgence et de catastrophe, et responsable des formations à l'ONG Mehad. La guerre fait partie des catastrophes humaines, mais c'est le seul domaine où la situation n'est pas figée et évolue, notamment en raison de la mouvance du front.

COURTESY MEHAD

COURTESY MEHAD

L'échographe portatif relié à un smartphone permet au médecin de hiérachiser les priorités (à gauche). Des bras de mannequins sont utilisés pour la formation à la perfusion par voie veineuse (ci-dessus).

de matériel, de personnel et de structures constituent toujours un défi de taille pour les soignants. Des conditions auxquelles il est très difficile de se préparer et de se former en amont. *« Tout d'abord, lors de sa formation classique, un chirurgien n'a que très rarement l'occasion de pratiquer de telles opérations. Les pathologies classiques des organes vitaux n'ont rien à voir avec les dommages que les soldats peuvent subir au combat. De même, les accidents de la voie publique* [accidents de voiture, de vélo] *n'ont rien de commun avec les blessures de guerre »*, explique le Dr François Pons, professeur de chirurgie et ancien directeur de l'École de médecine du Val-de-Grâce, à Paris *(lire l'interview p. 72). « Les chirurgiens ont beau prendre des gardes de Samu ou dans des grands "trauma centers", cela ne les prépare pas à ce qu'ils devront gérer sur le front. »* Ce n'est que là qu'ils seront confrontés à un patient dont la rate a été abîmée par un éclat d'obus ou de multiples lésions dues à une arme automatique.

À Poitiers, une formation unique en Europe

Depuis 2016, la faculté de médecine de Poitiers propose une formation unique en Europe. Elle consiste à s'exercer sur des personnes déjà décédées. Au laboratoire d'anatomie, des étudiants et membres de sociétés de médecine opèrent des corps donnés à la science, perfusés et ventilés. Comme pour chaque opération sous anesthésie générale, le corps, visage y compris, est totalement recouvert d'un champ opératoire, à l'exception de la zone qui va être soignée. Seules différences pour les participants par rapport à ce qu'ils rencontreront sur le terrain : un chariot à roulettes chargé de faire circuler le faux sang et un ordinateur pour régler les constantes vitales. Grâce à la ventilation, la cage thoracique se soulève et s'abaisse comme le ferait celle d'un véritable patient intubé. *« Toute l'année, une permanence est ouverte 24 heures sur 24 au laboratoire d'anatomie, qui est prévenu dès qu'un potentiel nouveau corps peut être reçu. Trois jours avant la formation, les corps,*

KARINE PIERRE / HANS LUCAS VIA AFP

> « L'idée est de distinguer ce qui est urgent de ce qui ne l'est pas et d'identifier les personnes qu'on ne peut pas réanimer »
>
> **Raphaël Pitti,** professeur agrégé en médecine d'urgence et de catastrophe, responsable des formations à l'ONG Mehad

FRANÇOIS PONS

AVIS D'EXPERT

FRANÇOIS PONS
PROFESSEUR DE CHIRURGIE ET ANCIEN DIRECTEUR DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE DU VAL-DE-GRÂCE, À PARIS

« Il faut réussir à stabiliser un blessé pendant 24 heures »

Qu'est-ce que la* golden hour, *le standard actuel en matière de médecine de guerre ?
La *golden hour*, la première heure pendant laquelle il faut traiter un blessé avant de l'évacuer a longtemps été en vigueur. Mais dans un conflit de haute intensité, lorsqu'on n'a plus la maîtrise des voies aériennes et que les voies terrestres deviennent trop dangereuses en raison des drones et des bombardements rendant impossibles les évacuations, se pose la question de passer au *golden day*. C'est-à-dire qu'il faut réussir à stabiliser le blessé pendant 24 heures avant qu'il n'ait accès à la chirurgie dont il a besoin.

Quels conflits font penser qu'il va falloir s'adapter à de nouvelles stratégies ?
La guerre en Arménie fait beaucoup de morts. Les blessés ne sont pas loin des hôpitaux car le conflit se trouve sur leur territoire, mais c'est très difficile de parvenir à les déplacer jusqu'aux hôpitaux de référence. Il s'agit de polyblessés, des personnes victimes d'explosions et criblées de blessures dans un conflit à haute intensité. La guerre en Ukraine semble relever de problématiques similaires, même s'il faudra analyser la situation *a posteriori*, lorsque nous aurons tous les éléments.

La formation des soignants va-t-elle s'adapter à ces nouvelles façons de faire la guerre ?
Malgré les formations en chirurgie, il n'est pas facile de répondre à ces nouveaux aspects de la guerre. Le nœud du problème consiste à réussir à maîtriser une hémorragie sur une telle durée. Certaines pistes lancées en matière de robotique restent à l'état de recherche. Les ballonnets intra-aortiques permettent de stopper certains saignements sans opérer mais malheureusement pas tous. Certaines mousses qui s'injectent dans l'abdomen finissent par coller aux tissus. L'enjeu va surtout être de faire admettre le nombre de morts pour lesquels la médecine n'a rien pu faire.

■ **Propos recueillis par C. L.**

préparés au préalable par une thanatopractrice, sont sortis de leur entrepôt à -18 °C afin de décongeler lentement jusqu'au jour J », explique le Pr Jean-Pierre Richer, qui a imaginé cette technique. Ils sont ensuite appareillés pour recréer les conditions les plus proches de la réalité. Des canules sont placées dans la carotide, dans la jugulaire et dans les artères et veines fémorales du corps afin de simuler la circulation sanguine grâce à un faux sang chaud composé de colorants, dont la viscosité recrée des conditions proches de la réalité. *« En moins d'une heure, quel que soit le nombre de lésions qui saignent, il faut avoir traité tout ce qui relève du* damage control », indique François Pons. L'objectif principal est de stopper les hémorragies, suturer ou comprimer les tissus et fermer les organes abîmés. Dans le cas de lésions intestinales par exemple, le médecin doit fermer les brèches, retirer les morceaux détruits, interrompre l'afflux de sang avec des clamps, sortes de pinces chirurgicales à deux branches, sans chercher à réparer complètement. *« Le patient pourra être réopéré plus tard pour un deuxième temps de réparation complète de l'intestin ainsi que pour des actes complémentaires moins urgents. »*

Avoir déjà vu des lésions de guerre fait gagner du temps

Sans prétendre faire des chirurgiens des professionnels de la médecine de guerre en l'espace d'une formation à Poitiers, ces journées leur offrent un avantage inestimable : celui d'avoir déjà vu ce type de lésions et de les avoir déjà traitées. *« Sur un terrain de guerre, le temps est particulièrement compté. Avoir déjà pratiqué ce genre de gestes et avoir réfléchi à ces problématiques permet de montrer un peu plus d'assurance »*, appuie François Pons. *« Voir les morts fait partie de notre travail. C'est de voir tous ceux qu'on aurait pu sauver et qu'on a laissé mourir qui nous heurte le plus. Se dire : "ce brûlé, j'aurais pu lui passer des produits, celui-là j'aurais pu l'intuber… mais je n'avais pas ce qu'il fallait et ils sont morts" »*, complète Raphaël Pitti. Chaque médecin sait qu'il ne pourra pas sauver tous les blessés sur un terrain de guerre. Mais tous gardent le même objectif : sauver le plus de monde possible. ■

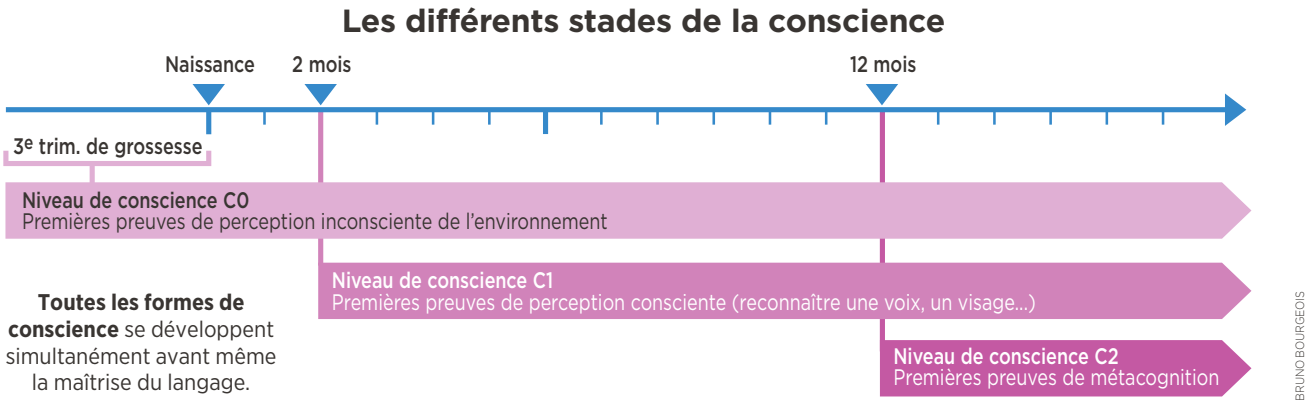
STEPHANE AUDRAS/REA

Le degré de réaction du bébé placé face à des images changeantes est mesuré avec une caméra qui suit le mouvement de ses yeux.

Quand bébé devient un être conscient

Comment les nourrissons perçoivent-ils les informations de leur environnement ? Pour mieux comprendre le rôle clé des premiers mois de la vie, les scientifiques multiplient les expériences originales afin de détecter l'émergence de la conscience.

« *Ainsi font, font, font…* » Des mouvements, du chant, un visage qui sourit. Le bébé voit et entend, mais quelles pensées élabore-t-il ? Les efforts des parents tombent-ils dans une oreille inconsciente et un esprit engourdi ? La réponse est non. « *On pense qu'il existe une conscience dès les premières semaines après la naissance mais qu'elle est ralentie. Le cortex frontal est simplement immature : il fonctionne déjà, mais pas aussi vite que chez l'adulte* », révèle Stanislas Dehaene, responsable de l'unité de recherche en neuro-imagerie cognitive à Neurospin (Paris-Saclay, Essonne). À partir de quel stade est-il pertinent de parler de conscience ? Nul ne le sait exactement, mais les experts s'accordent à dire que cela peut être très précoce. Avant même la naissance ? Pour le savoir, des chercheurs français ont examiné en 2017 l'activité cérébrale de nourrissons nés prématurément


Les différents stades de la conscience
Naissance
2 mois
12 mois
3e trim. de grossesse
Niveau de conscience C0
Premières preuves de perception inconsciente de l'environnement
Niveau de conscience C1
Premières preuves de perception consciente (reconnaître une voix, un visage…)
Niveau de conscience C2
Premières preuves de métacognition
Toutes les formes de conscience se développent simultanément avant même la maîtrise du langage.
BRUNO BOURGEOIS

au début du troisième trimestre de grossesse, lorsque le cerveau se met en place. « *Vers sept mois et demi de grossesse, le fœtus sait faire la différence entre le son "ba" et le son "ga", entre des voix d'homme et de femme,* raconte Stanislas Dehaene. *Ces travaux montrent des réponses à la nouveauté, mais il ne s'agit pas forcément de conscience.* »
Afin de bien saisir les nuances, les scientifiques ont défini plusieurs stades distincts de conscience. La perception et le traitement inconscients des *stimuli* extérieurs, comme chez les prématurés, sont nommés C0. Quand la perception est consciente — on prend conscience de la voix de sa mère, du goût d'un aliment —, c'est le niveau C1. Enfin, le stade C2, également appelé métacognition, désigne la conscience de ses propres pensées *(voir le schéma ci-dessus)*.
Problème : puisque les bébés ne peuvent pas verbaliser ce qu'ils perçoivent, leur niveau de conscience est difficilement évaluable par les chercheurs. Aussi ils doivent imaginer des protocoles indirects, et pour cela, la France compte certains des meilleurs spécialistes. « *Notre stratégie consiste à chercher chez le bébé des phénomènes cognitifs dont on sait qu'ils sont associés à la conscience chez l'adulte* », explique Jean-Rémy Hochmann, directeur de recherche au CNRS, spécialiste en sciences cognitives du développement.

Un clignement d'yeux révélateur

Dans son laboratoire installé à Lyon au sein de l'Institut des sciences cognitives Marc Jeannerod, l'équipe a fait asseoir une centaine de bébés de 5 mois, 8 mois ou 3 ans sur les genoux de leurs parents. Face à eux, un écran affiche un premier visage, puis — après un temps variable — un autre à côté. « *Si le bébé perçoit consciemment le deuxième visage, son regard devrait aller du premier au second* », explique-t-il. Mais il existe un temps de latence pendant lequel le second visage ne peut pas être consciemment perçu par le cerveau, déjà occupé à traiter le premier. Ce « clignement attentionnel » est une preuve de conscience établie chez l'adulte, de niveau C1. Tout comme un clignement d'yeux rend momentanément aveugle, il s'agit d'un goulet d'étranglement dans la perception qui rend aveugle à un *stimulus* trop rapproché du précédent. Chez l'adulte ainsi que chez l'enfant dès 3 ans, ce temps aveugle dure environ 200 millisecondes. Mais d'après les résultats publiés en 2022, il est trois fois plus long chez les bébés de 8 mois, et six fois plus long à 5 mois, dépassant la seconde. Mais il existe bien ! « *C'est une preuve de conscience parmi les plus précoces jamais démontrées* », pointe Jean-Rémy Hochmann. Une conscience naissante, fonctionnant plus lentement que celles des adultes. « *Il faut plus de temps aux bébés qu'aux adultes pour obtenir les informations et devenir conscient* », note Stanislas Dehaene.
Ces nouveaux résultats viennent conforter ceux obtenus par une autre équipe française et publiés en 2013 dans *Science*. Dans cette expérience menée à Paris, des adultes et des bébés ont également été confrontés à des visages (car ils attirent particulièrement l'attention des tout-petits). Là aussi, les chercheurs ont détecté, dès l'âge de 5 mois, une activité cérébrale caractéristique de la per-

THÉORIES

Une activité neuronale globale

Qu'est-ce qui différencie un état du cerveau avec et sans perception consciente ? Si plusieurs théories s'affrontent, deux sortent du lot. La théorie de l'information intégrée, promue par l'Italien Giulio Tononi, postule que la conscience est dépendante d'un degré de complexité des circuits de l'information, c'est-à-dire du nombre de connexions. D'après la théorie de l'espace de travail neuronal global, développée par des chercheurs français, l'information ne devient consciente que lorsqu'elle est globalement distribuée dans le cerveau. Pour Stanislas Dehaene, la conscience suppose ainsi une communication accrue entre les régions du cerveau quand notre attention se focalise sur un objet : *« On voit apparaître un embrasement global de l'activité neuronale et une diffusion de l'information à l'échelle de tout le cerveau. »*

ception, mais presque une seconde après la diffusion de l'image, contre 300 millisecondes chez l'adulte. *« Les ondes cérébrales sont très similaires à celles de l'adulte mais décalées dans le temps »*, détaille Stanislas Dehaene.

Et si le niveau C1 était atteint même avant l'âge de 5 mois ? En 2014 à Paris, l'analyse de l'activité cérébrale de bébés d'à peine 2 mois a révélé qu'ils perçoivent déjà un son inattendu diffusé au sein d'une séquence apprise. Mais ces expériences — un visage qui s'impose, un son qui interpelle — ne mesureraient-elles pas l'attention plutôt que la conscience ? *« À 2 mois, on voit déjà une réponse globale à la nouveauté liée à l'attention, la signature de la conscience. Il est cependant difficile de faire la distinction entre les deux, car ce sont des phénomènes liés,* explique Stanislas Dehaene. *L'attention est une série de systèmes qui permettent de sélectionner une information parmi toutes celles qui bombardent notre cerveau. Beaucoup des étapes de ce filtrage attentionnel ne sont pas conscientes, mais la dernière, c'est l'accès à la conscience. »*

La métacognition ou réfléchir sur ses propres pensées

Dernière étape, l'aboutissement de la construction de la conscience permet d'atteindre la métacognition ou niveau C2. Celle-ci se définit comme *« le fait de réfléchir sur ses propres pensées, et pas seulement d'avoir conscience du monde »*, explique Louise Goupil, chercheuse spécialiste des sciences cognitives au CNRS. Avec ses collaborateurs, elle a montré un jouet à des bébés de 18 mois avant de le mettre dans une des deux boîtes présentées sur la table. Les boîtes étaient ensuite cachées derrière un écran et vidées, puis à nouveau montrées à l'enfant. Lorsqu'ils choisissaient la bonne boîte, les enfants persistaient plus longtemps que les autres à la fouiller, voire demandaient de l'aide à un adulte, signe qu'ils avaient confiance en leur choix : ils savent qu'ils savent ! Même résultat chez les bébés de 12 mois, cette fois avec des images de visages qui apparaissaient sur un seul côté d'un écran en guise de récompense. Physiologiquement, les preuves concordent. Dans l'électroencéphalogramme, on observe chez ces bébés la même activité cérébrale caractéristique de la détection des erreurs que chez les adultes : quand ils se trompent, les bébés semblent s'en rendre compte. *« On pense qu'il y a une architecture cognitive qui se met en place dans les deux premières années de vie, qui permet une métacognition très basique,* interprète Louise Goupil. *Par exemple, évaluer si notre décision est correcte ou non après en avoir vu le résultat. »*

DUNG VO TRUNG / LOOKATSCIENCES

L'analyse des ondes cérébrales montre un décalage entre les perceptions du bébé et de l'adulte à la diffusion d'une image (ici au laboratoire de sciences cognitives de la maternité Port-Royal, à Paris).

Le langage, un accélérateur de conscience

Le niveau C0 atteint *in utero*, C1 à 2 mois, C2 à douze : cette complexification se fait-elle de manière séquentielle ? Les scientifiques pensent plutôt que toutes les formes de conscience se développent simultanément. *« Je crois beaucoup plus à un modèle parallèle, car on retrouve à la fois des preuves de conscience perceptive C1 et de métacognition C2 dans la première année de vie »*, abonde ainsi Stanislas Dehaene. Reste qu'avec le temps, les contenus de conscience deviennent de plus en plus élaborés, notamment grâce au développement du langage. Accélérateur de conscience, celui-ci agirait chez le bébé comme un échafaudage permettant le développement et la complexification de la pensée. Stanislas Dehaene compare ce processus à un arbre, dont chaque branche code pour un objet, un concept, une information : *« Au début, la pensée consciente dispose de peu d'états codants, puis atteint des centaines de milliers de branches. Avec le langage, le contenu devient extrêmement riche, nous devenons capables de penser à Dieu ou à l'infini. »* À l'inverse, des enfants exposés à un langage appauvri pendant leurs 18 premiers mois garderont toute leur vie des anomalies de traitement du langage, et une conscience irrémédiablement appauvrie, comme le souligne le rapport de la Commission des 1000 premiers jours, lancée par le gouvernement en 2019. D'où l'importance de stimuler l'enfant très tôt, sous peine que la richesse potentielle de sa conscience, comme les petites marionnettes, s'en aille. ■

Camille Gaubert

@CamilleGaubertb

PATRICK DELAPIERRE / INSERM

« À deux mois, on voit déjà une réponse globale à la nouveauté liée à l'attention, la signature de la conscience »

Stanislas Dehaene, responsable de l'unité de recherche en neuro-imagerie cognitive à Neurospin (Paris-Saclay, Essonne)

Faut-il se laisser tenter par les boissons sans alcool ?

Il faut les consommer avec modération car des traces d'alcool peuvent subsister et des sucres ont souvent été ajoutés afin d'en améliorer le goût.

Cidre, vin, whisky… sans alcool ! Voilà quelques années, les rayons des supermarchés ont vu arriver ces boissons, à commencer par les bières. Depuis, tous les géants du secteur (Bacardi-Martini, Pernod Ricard, …) soignent leur image en proposant une gamme sans alcool qui s'apparente au gin, au rhum ou à la vodka. Même la filière viticole s'y est mise. Avec ces breuvages, tous espèrent toucher un plus large public tel que les femmes enceintes, les conducteurs, mais aussi celles et ceux qui souhaitent adopter des habitudes de vie plus saines. L'enjeu est de taille. Car, si la tendance est en baisse, les Français consomment annuellement environ 12 litres d'alcool pur par habitant de 15 ans et plus (1). Toutefois, ces nouvelles boissons ne sont pas une panacée et doivent aussi être consommées avec modération.

L'alcool accroît le risque de maladies…

Outre des effets sur la mémoire, le sommeil ou le risque de dépendance, la consommation d'alcool a une influence sur le développement de nombreuses pathologies dont les maladies cardio-vasculaires, digestives et les cancers. Le Centre international de recherche sur le cancer (Circ), qui a classé l'alcool comme cancérogène avéré en 1988, estime que 5 % des nouveaux cas de cancers (soit 20 000 cas) détectés en 2020 en France sont liés à l'alcool (2). Huit localisations de cancers ont un lien avéré avec la consommation d'alcool : la bouche, le larynx, le pharynx, l'œsophage, le foie, le côlon et le rectum, et enfin le sein.

22 %

des foyers français ont acheté des bières sans alcool en 2020.

(SOURCE : KANTAR WORLDPANEL)

… même consommé modérément

Les autorités françaises conseillent de ne pas boire plus

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

MALTAGE Transformation d'une céréale (orge, seigle, etc.) en graine germée (malt) puis cuite afin de dégager tous ses arômes lors de l'élaboration de boissons alcoolisées telles que le whisky et la bière.

FERMENTATION ALCOOLIQUE Processus au cours duquel les sucres présents dans le moût sont consommés par les levures, ce qui va produire de l'alcool et du gaz carbonique.

SULFITES Composants chimiques issus du soufre, utilisés pour arrêter la fermentation et conserver le nectar. Certaines personnes y sont particulièrement sensibles et ressentent après leur ingestion de la fatigue, des maux de tête, etc.

de dix verres par semaine, sans dépasser deux verres par jour, et d'entrecouper les jours de consommation de jours d'abstinence (3). Pour rappel, 10 g d'éthanol pur correspondent à 10 cl d'un verre de vin à 12°, 25 cl de bière à 5° ou 3 cl de whisky à 40°. Toutefois, les risques pour la santé (maladies cardio-vasculaires, AVC, cirrhose, accidents) existent dès le premier verre d'alcool, quel qu'il soit (4). Ainsi, consommer une seule boisson alcoolisée par jour (équivalente dans cette étude à 12 g d'éthanol pur, soit 33 cl de bière, par exemple) pourrait augmenter de 16 % le risque de fibrillation auriculaire, un trouble du rythme cardiaque (5).

Les boissons sans alcool sont désalcoolisées…

Boissons alcoolisées ou non suivent généralement le même processus de fabrication : maltage de céréales (houblon, orge…) et brassage pour la bière ou certains spiritueux tel le whisky ; macération ou pressurage des grains de raisin pour le vin, suivis d'une fermentation alcoolique.

Pour éliminer l'alcool, diverses techniques sont possibles : réduire le temps de fermentation (en ajoutant des levures spécifiques ou en abaissant la température), porter le liquide à haute température (évaporation) ou encore faire passer le breuvage sous pression dans une membrane (osmose inverse) afin de séparer les molécules d'alcool du reste de la boisson.

Certains spiritueux sont élaborés à partir d'un mélange d'arômes ou d'une macération de plantes aromatiques (genièvre, coriandre, etc.) distillées avec de l'eau plutôt qu'avec une base alcoolisée.

… mais pas toujours en totalité

Hormis les boissons clairement stipulées « 0 % d'alcool », les vins « partiellement désalcoolisés » peuvent en afficher jusqu'à 8,5 % et les bières dites sans alcool, jusqu'à 1,2 % (6). Sur plusieurs verres, ces petites quantités d'alcool peuvent se révéler non négligeables. Par conséquent, ces boissons ne conviennent pas aux personnes qui ne doivent pas consommer du tout d'alcool parce qu'elles sont enceintes, abstinentes, en cours de sevrage ou pour des raisons médicales.

Elles apportent moins de calories, mais parfois plus de sucre

Comme le degré d'alcool est réduit, les boissons sans alcool sont *de facto* moins caloriques (pour rappel, 1 g d'alcool apporte environ 7 kcal). Exemples : 3 cl de rhum sans alcool de la marque britannique Lyre's fournissent 4,5 kcal, contre 72 kcal pour son homologue à 40 %. En revanche, certaines boissons comme les bières peuvent contenir, à l'instar des sodas, des sucres ajoutés (comme le sirop de glucose) afin d'en améliorer le goût. Les boissons sans alcool renferment aussi des additifs tels que des acidifiants (acide citrique) et des conservateurs (sorbate de potassium, benzoate de sodium). Enfin, qui dit sans alcool ne signifie pas pour autant sans sulfites. Mieux vaut garder un œil sur les étiquettes. ■

Sylvie Boistard
@syboistard

PR AMINE BENYAMINA Chef du service de psychiatrie et d'addictologie de l'Hôpital Paul-Brousse, à Villejuif (Val-de-Marne) et président de la Fédération française d'addictologie*

Une possible voie vers l'alcoolisation

« Les boissons dites sans alcool maintiennent une culture de l'alcoolisation et jouent sur ce lien en gardant un packaging similaire. C'est aussi une façon pour les jeunes de les préparer à boire de l'alcool une fois adultes. Pour les personnes abstinentes, consommer ces boissons comme si de rien n'était, peut être dangereux car il faut dans leur situation définitivement renoncer non seulement à l'alcool mais à tout ce qui y ressemble de près ou de loin. »

* Auteur avec Marie-Pierre Samitier de *Comment l'alcool détruit la jeunesse*, Albin Michel.

(1) Consommation d'alcool en France : où en sont les Français ?, Santé publique France, 2020.

(2) Global burden of cancer in 2020 attributable to alcohol consumption : a population-based study, Rumgay H. et al, *The Lancet Oncology*, 2021.

(3) Avis d'experts relatif à l'évolution du discours public en matière de consommation d'alcool en France, INC, Santé publique France, 2017.

(4) Alcohol use and burden for 195 countries and territories, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016, GBD 2016 Alcohol Collaborators, *The Lancet*, 2018.

(5) Alcohol consumption, cardiac biomarkers, and risk of atrial fibrillation and adverse outcomes, Csengeri D. et al, *European Heart Journal*, 2021.

(6) Décret n° 92-307 du 31 mars 1992 portant application de l'article L. 412-1 du code de la consommation.

CAIA IMAGE/SCIENCE PHOTO LIBRARY / AFP

Cinq questions pour prendre soin de ses cheveux

Shampoings et produits divers, teintures, lotions contre la calvitie, traitements antipoux… Nos cheveux sont l'objet de très nombreux soins ! Mais que savons-nous vraiment de leur efficacité ?

Par Émilie Gillet, avec Agence Forum News

1 Peut-on prévenir la chute de cheveux ?

L'alopécie touche un homme sur trois après 50 ans, et près d'une femme sur deux après 80 ans. Le plus souvent, elle a une origine hormonale, on parle d'alopécie androgénétique. La DHT, molécule dérivée de la testostérone, stimule le métabolisme des follicules pileux jusqu'à les épuiser, accélérant ainsi la chute des cheveux. S'il n'existe aucun moyen de prévenir ou de stopper ce phénomène, plusieurs traitements peuvent le ralentir. D'une part, les lotions au minoxidil, qui ralentissent les cycles des follicules pileux, mais sont susceptibles de provoquer des irritations. D'autre part le finastéride, qui se prend par voie orale et bloque la DHT. Initialement développé contre l'hypertrophie bénigne de la prostate, ce médicament a des effets indésirables non négligeables : risque accru d'hypotension, perte de libido, dépression. Les deux traitements peuvent être utilisés conjointement. Aux États-Unis, un autre médicament a été autorisé par la FDA (Food and Drug Administration) en 2022, il s'agit d'un inhibiteur de JAK (pour Janus kinases), initialement mis au point pour traiter des maladies inflammatoires chroniques mais qui a aussi pour effet de stimuler la production de nouveaux cheveux. Enfin, quand la calvitie est déjà trop importante, seule une autogreffe de follicules pileux est envisageable.

2 À quelle fréquence se laver les cheveux ?

Il y a celles et ceux qui se lavent les cheveux tous les jours ou presque. Et d'autres qui préfèrent espacer les lavages, une fois par mois ou par trimestre, voire plus aucun lavage sous l'eau. Ce sont les tendances *low poo* et *no poo* (« moins de shampoing » et « pas de shampoing ») apparues ces dernières années, qui ne sont pas sans risque : en laissant s'accumuler sébum et peaux mortes, on déséquilibre le microbiote cutané très particulier du crâne, avec à la clé un risque accru de pellicules. Certains se tournent par ailleurs vers le fait maison, avec des shampoings secs à base de bicarbonate de soude : or, si celui-ci permet de bien absorber le gras, il a le gros inconvénient d'avoir un pH élevé (basique) et donc d'irriter le cuir chevelu et de favoriser la production de sébum ! Pour les dermatologues, en dehors de problèmes particuliers, l'idéal est de se laver les cheveux une à deux fois par semaine, en optant de préférence pour un shampoing au pH plutôt acide (entre 4,7 et 5,5) qui se rince à l'eau.

3 Comment lutter efficacement contre les pellicules ?

Plusieurs facteurs peuvent expliquer la formation de pellicules, qui sont des peaux mortes. Il peut s'agir d'un embal-

CHIFFRES CLÉS

Un crâne adulte compte entre 100 000 et 150 000 cheveux
et en perd 50 à 100 par jour en situation normale.

Un cheveu mesure entre 0,05 et 0,1 mm de diamètre
et pousse à la vitesse de 1 cm par mois en moyenne.

Pour être heureux, mangez mieux

Les études sont formelles : ce que nous mangeons influence directement notre humeur. Non seulement un bon repas est source de plaisir, mais une alimentation saine et équilibrée favorise aussi une humeur positive.

Des nutriments qui font du bien

Les centaines de milliards de neurones qui constituent le cerveau s'échangent en permanence des molécules appelées neurotransmetteurs, tels que la sérotonine, la dopamine et le GABA notamment qui influencent l'humeur. Sans eux, le moral est plus facilement en berne ! Le cerveau consomme chaque jour 20% des réserves de glucose, mais il a également besoin de nutriments spécifiques pour faire fonctionner son réseau de neurones et fabriquer les neurotransmetteurs.

Faire le plein d'Omega 3

Ces acides gras sont des constituants essentiels de la membrane qui enveloppe les cellules, et notamment les neurones. Des études ont montré le lien direct entre une carence en Omega 3 et la survenue d'une sensation de mal-être.

B comme Bien-être

Les Vitamines B, et en particulier les Vitamines B3, B6 et B9, sont essentielles au maintien de fonctions psychologiques normales. La Vitamine B5 participe en outre à la synthèse des neurotransmetteurs.

Magnésium : gare à la carence

Une carence en Magnésium peut favoriser les troubles de l'humeur. En situation d'anxiété, il est expulsé en grandes quantités des cellules. En situation d'angoisse intense et/ou chronique, le corps épuise donc rapidement ses réserves. Il s'ensuit non seulement de la fatigue, mais aussi une plus grande sensibilité à l'anxiété.

Des plantes dans votre assiette

Les pistils de la fleur de Safran contribuent à préserver l'équilibre émotionnel en favorisant une humeur positive et une sensation de relaxation, propices au bien-être.

La racine de Rhodiola est adaptogène : elle aide l'organisme à résister normalement aux situations d'anxiété. Son efficacité sur le burn-out a d'ailleurs été démontrée de très nombreuses fois dans des études cliniques.

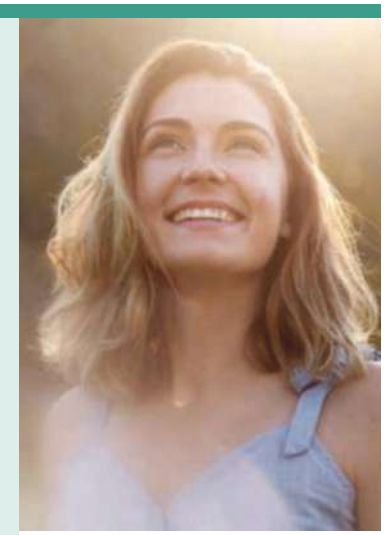
Un geste simple pour retrouver le sourire

Zenytud est un concentré d'actifs naturels d'exception (Rhodiola, Safran et Lactium®) associés pour la première fois en une même formule pour agir sur les neurotransmetteurs les plus importants dans les troubles anxieux (GABA, sérotonine, dopamine).

Leur action synergique fait de Zenytud une formule à la fois puissante et naturelle, idéale en situation de mal-être psychologique.

Zenytud contient également du bisglycinate de Magnésium, la forme la mieux assimilée par l'organisme, ainsi que des Vitamines B qui contribuent à des fonctions psychologiques normales et à réduire la fatigue.

Zenytud peut être pris en continu tout au long de l'année et ne provoque ni effet indésirable ni accoutumance. La formule de **Zenytud** étant fortement concentrée, il est recommandé de demander l'avis d'un médecin avant son utilisation.



Des conseils ?

Les experts du Laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au 01 85 81 22 23 et sur www.zenytud.com

Zenytud est disponible en pharmacie grâce au code ACL.

Zenytud 60 gélules végétales code ACL **602 42 55**.

MILENA PERDRIEL

AVIS D'EXPERTE

DR NINA ROOS DERMATOLOGUE

« Il faut veiller à avoir de bons apports alimentaires »

Quelles sont les mauvaises habitudes capillaires à abandonner ?
Toutes les coiffures opérant une traction forte sur le cuir chevelu, comme le tressage ou les chignons serrés, peuvent à long terme diminuer la densité des cheveux et faire reculer la ligne frontale d'implantation. Les contraintes mécaniques et chimiques liées aux permanentes et lissages à répétition endommagent quant à elles la texture des cheveux, en les rendant plus secs et plus cassants. Enfin, la consommation de tabac peut aggraver un phénomène préexistant de chute de cheveux, car elle provoque une vasoconstriction et donc une moins bonne oxygénation des follicules pileux.

Quels gestes favorisent-ils la santé des cheveux ?
Il faut notamment veiller à avoir de bons apports alimentaires en fer, en vitamines B et D. Si on opte pour un régime restrictif de type végétarien ou végétalien, il faut donc surveiller attentivement son équilibre alimentaire. Contrairement à une idée reçue, se couper régulièrement les cheveux ne les renforce pas, ce ne sont pas des plantes vertes ! Cela permet juste d'ôter les pointes fourchues.

Quand faut-il s'inquiéter et consulter ?
Toute chute de cheveux inhabituelle dans son intensité ou sa durée doit amener à consulter son médecin généraliste ou un dermatologue. Cela peut être le signe d'une carence alimentaire ou d'un bouleversement hormonal comme la ménopause ou une hypothyroïdie. *Idem* en cas de pelade, une perte de cheveux très localisée, ou de pellicules importantes alors que vous n'en souffrez pas d'habitude. ■ **Propos recueillis par É. G.**

lement du cycle de renouvellement des cheveux qui conduit à une production importante de cellules épidermiques. Ou bien du champignon *Malassezia*, naturellement présent sur notre cuir chevelu et qui se nourrit de sébum. Il arrive en effet que les acides gras produits par ce champignon irritent le cuir chevelu et provoquent une inflammation locale, favorisant ainsi la desquamation (élimination des couches supérieures de l'épiderme). C'est alors l'entrée dans le cercle vicieux sébum-champignons-inflammation-desquamation… Pour briser ce cycle, des shampoings adaptés permettent de réduire la production de sébum et de limiter la prolifération du champignon. Pour être efficaces, ils doivent être utilisés plusieurs mois durant : seuls lors du traitement d'attaque de 4 à 6 semaines, puis en traitement de fond, en alternance avec un shampoing doux classique.

4 Les colorations abîment-elles les cheveux ?

Avec l'âge, le blanchissement des cheveux est inéluctable même s'il ne survient pas à la même vitesse chez tout le monde. Il est lié à l'épuisement des mélanocytes, ces cellules présentes dans les follicules pileux responsables de la production de pigments.
La coloration directe permet de couvrir ces cheveux blancs en déposant à leur surface des pigments naturels ou synthétiques. Elle s'estompe après plusieurs lavages. Quant à la coloration permanente, elle consiste à associer deux produits : un oxydant de type ammoniac qui écarte les écailles des cheveux et décompose ses pigments naturels, puis un colorant qui va s'y fixer et donner une nouvelle couleur. Un shampoing permet ensuite de « refermer » les écailles et de piéger définitivement cette couleur. Lorsque cette technique est répétée trop souvent, elle fragilise d'une part la texture des cheveux, en les rendant plus cassants, et d'autre part le cuir chevelu qui devient plus sec ou, au contraire, qui va produire beaucoup plus de sébum, voire des pellicules.

5 Comment se débarrasser des poux ?

Pas facile d'échapper au problème, quand on est parent ou grand-parent… Les lotions préventives et autres remèdes de grand-mère à base d'huile essentielle de lavande ou de masque à l'huile d'olive sont à oublier. De même pour tous les produits à base d'insecticides type pyréthrinoïdes, car les poux développent des résistances et des effets indésirables sont suspectés à long terme (neurotoxicité). Les produits les plus sûrs et les plus efficaces sont des lotions à base de diméticone, une huile synthétique qui étouffe poux et lentes. À condition de respecter scrupuleusement leurs conditions d'usage : un temps de pose d'au moins 15 minutes, le passage d'un peigne très fin qui va déloger les parasites morts avant le shampoing et le rinçage, et un renouvellement de l'opération à J+7 voire J+14 pour être sûr de tuer lentes, poux en croissance et poux adultes. Et pour éviter aux enfants d'en attraper, il faut leur attacher les cheveux et leur conseiller de ne pas partager bonnets, casquettes et pulls à capuche. ■

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

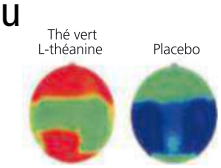
Indispensable irrigation

Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner



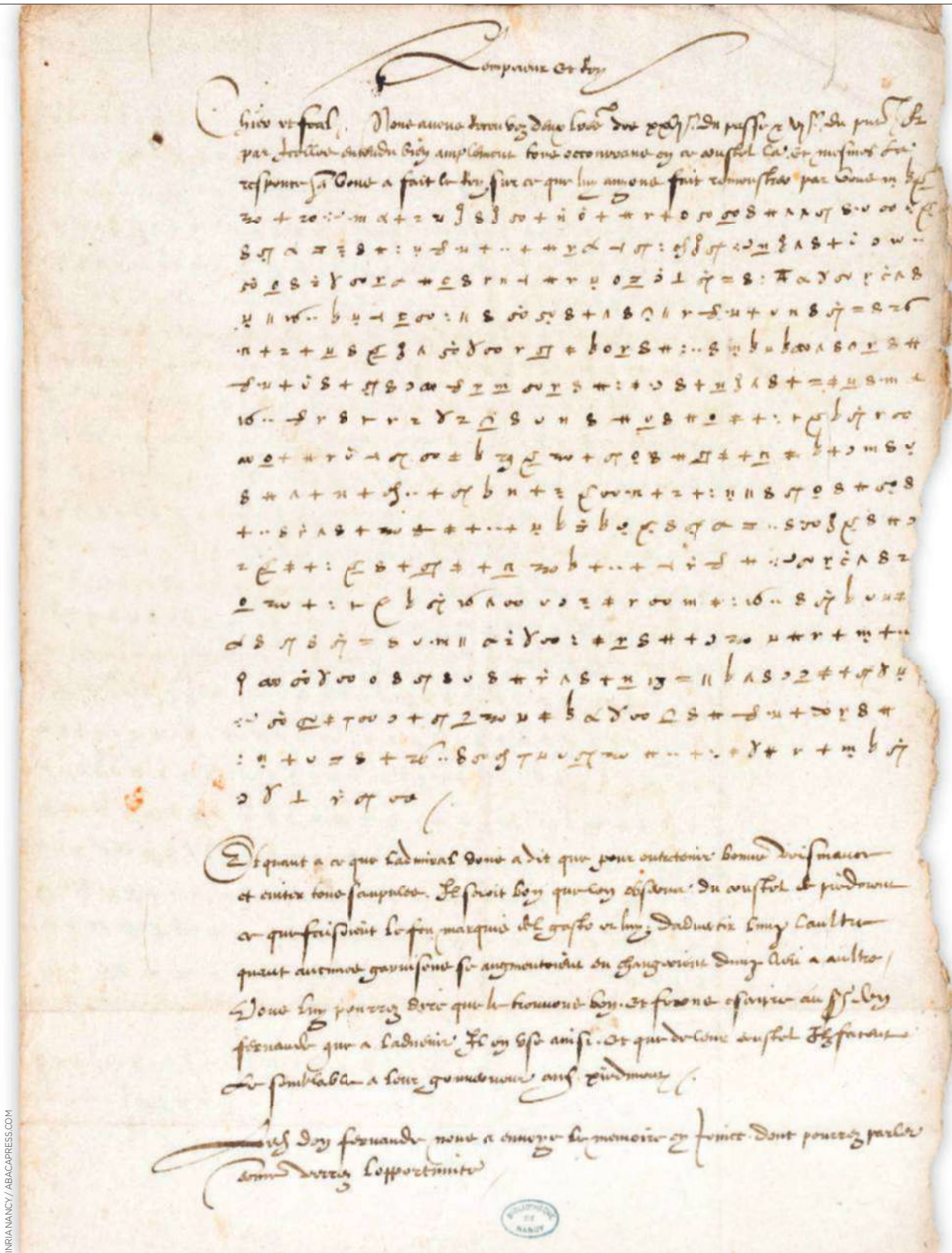
L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Des conseils ?

Les experts New Nordic vous répondent au 01 89 16 12 97 ou sur **www.vitalco.com**

Disponible en pharmacie

Cerveau Clair 60 cp est disponible grâce au code **ACL 295 18 63**



INRIA NANCY / ABACAPRESS.COM

La missive, rédigée en 1547 par Charles Quint et adressée à son ambassadeur auprès du roi de France, comporte quelques passages en clair et de longues séquences chiffrées.

Cryptographie

La correspondance codée de Charles Quint n'a plus de secrets

Une coopération entre cryptographes, informaticiens et historiens a permis de lever le voile sur une lettre « codée » du XVIe siècle. Un système de chiffrement complexe qui permettait à l'empereur de communiquer notamment avec son ambassadeur auprès de François 1er, son ennemi le plus redoutable.

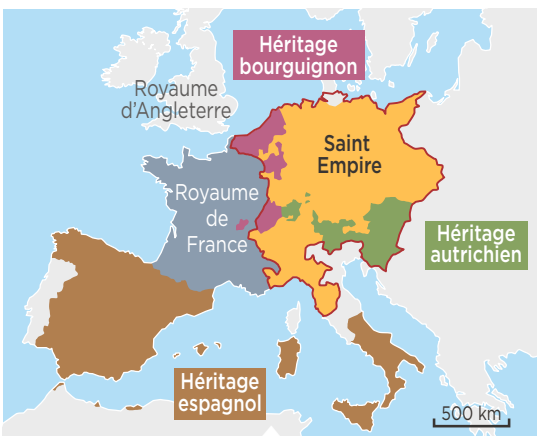
Par Marine Benoit @marin_eben

Lorsqu'un matin de décembre 2021, Cécile Pierrot découvre les pages brunâtres et couvertes de symboles, l'émerveillement la saisit : « *À ce moment-là, je réalise que non seulement la lettre existe bel et bien, mais qu'elle est aussi dans un état de conservation exceptionnel.* » Cette lettre, il s'agit de celle adressée le 22 février 1547 par Charles Quint à son ambassadeur en France Jean de Saint-Mauris. La missive a deux particularités : elle est écrite dans un langage codé et semble avoir totalement échappé aux historiens durant près de cinq siècles, au point qu'il soit tentant de se demander si, sans la détermination de Cécile Pierrot, chercheuse en cryptographie au Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications (Loria/université de Lorraine), elle ne serait pas encore restée plusieurs siècles au fond d'un tiroir. Le début de l'aventure autour de cette lettre historique se situe en 2019, lorsqu'au cours d'une soirée, une connaissance parle à Cécile Pierrot d'une « *mystérieuse lettre chiffrée signée de la main de Charles Quint* ». Après une rapide recherche sur Internet, la cryptographe ne trouve nulle trace du document et en déduit que son existence est une légende. Mais voilà que deux ans plus tard, la scène se répète. « *On évoque à nouveau cette lettre au cours d'un dîner. Mais cette fois, la personne n'en a pas seulement entendu parler,* raconte la chercheuse, *elle l'a vue de ses propres yeux, à Nancy.* » Problème : ce témoin précieux ne sait plus où il l'a aperçue. Cécile Pierrot convainc alors sa colocataire, employée au musée des Beaux-Arts nancéien, de mener l'enquête. Par un jeu de bouche-à-oreille, l'amie remplit sa mission : elle établit que la lettre repose sur une étagère du fonds des autographes de la bibliothèque Stanislas. Pourquoi là-bas ? « *Nul ne le sait,* répond la chercheuse. *On ignore aussi depuis quand elle s'y*

CONTEXTE

Un empire menacé par les princes luthériens

Depuis 1494, les guerres d'Italie voient s'affronter rois de France et rois d'Espagne. Néanmoins, des périodes de trêves rythment les campagnes militaires. Le moment où Charles Quint écrit sa lettre à Jean Saint-Mauris s'inscrit dans l'une de ces périodes de « calme avant la tempête ». Le souverain européen le plus puissant de la première moitié du xvie siècle, dernier monarque à entretenir le fantasme d'un « empire chrétien unifié », est en février 1547 très préoccupé par une rébellion des princes allemands luthériens dirigée par Jean-Frédéric de Saxe et désignée sous le vocable de ligue de Smalkalde, du nom de la ville où princes et villes ont conclu leur alliance. Ceux-ci réclament la reconnaissance du luthérianisme, interdit en vertu de l'édit de Worms de 1521, et sont soutenus par François 1er, ennemi de toujours de Charles Quint. À peine un mois après la rédaction de la lettre, le roi de France meurt et cède son trône à son fils Henri II.



BRUNO BOURGEOIS

La domination européenne de Charles Quint s'est constituée à la suite de trois successions dynastiques et de son élection à la tête du Saint Empire en 1519.

trouve. Elle n'a même pas de cote [référence qui permet de retrouver un document dans une bibliothèque]. » Quoi qu'il en soit, Cécile Pierrot se tient quelques semaines plus tard face au délicat document, prête à relever le défi : découvrir ce que l'empereur du Saint Empire romain germanique avait de si secret à dire à son représentant dans le royaume de son grand rival, François 1er.

« *En voyant la lettre écrite sur pas moins de trois pages, complète et parfaitement lisible, et en partant du principe que celle-ci a été rédigée à la Renaissance, une période précoce pour la cryptographie, j'ai d'abord pensé que j'allais la déchiffrer en quelques heures, deux jours tout au plus.* » Présomption de cryptographe moderne ! Cécile Pierrot confesse en riant qu'il lui faudra plusieurs mois pour en venir à bout. « *Le système de chiffrement était bien plus complexe que je ne l'avais imaginé.* » La mathématicienne découvre en effet que le texte compte plus d'une centaine de symboles, ce qui écarte d'emblée le fait qu'un symbole puisse correspondre à une lettre de l'alphabet. De plus amples recherches lui confirment justement que la mode cryptographique de l'époque consiste à attribuer un symbole à des bigrammes ou à des trigrammes, autrement dit à des assemblages de deux ou trois signes — généralement des lettres de l'alphabet —, formant eux-mêmes un phonème.

Mais ce n'est pas tout : elle découvre que Charles Quint était un adepte des symboles « nuls », c'est-à-dire qui ne correspondent à rien et qui n'ont d'autre fonction que d'embrouiller le lecteur. Face à cette complexité, Cécile Pierrot encode la lettre entière en Python, un langage informatique qui lui permet de réaliser de premières analyses statistiques. De cette manière, la chercheuse peut établir la fréquence des symboles, mais aussi comparer le texte avec un autre de la même époque, traduit également en Python. En l'occurrence avec *Pantagruel*, publié par Rabelais en 1532. Mais au bout de quarante-huit heures, l'ordinateur est à la peine. Et la chercheuse de conclure alors que la puissance de calcul ne lui permettra pas d'aboutir en un temps raisonnable.

Un bond de géant après quatre mois de tâtonnement

« *Il allait falloir faire les choses à l'ancienne. J'ai donc appelé des collègues pour leur demander de jouer avec moi* », plaisante la jeune femme. Ainsi débarquent dans la partie deux autres chercheurs en informatique du Loria, Paul Zimmermann et Pierrick Gaudry, spécialistes de la factorisation des nombres entiers. De février à juin 2022, tous trois avancent à petits pas, entre observations à l'œil nu et réponses obtenues grâce à l'ordinateur. Ils voient notamment des motifs apparaître : trois ou quatre symboles d'affilée se répètent plusieurs fois et, à deux endroits, pas moins de 11 symboles sont alignés dans le même ordre, signe qu'ils tiennent sans doute là un mot entier. « *Malgré tout, nous n'arrivions pas à don-*

CEDRIC JACQUOT/MAXPPP

« En voyant la lettre, complète et parfaitement lisible, j'ai pensé que j'allais la déchiffrer en quelques heures, deux jours tout au plus »

Cécile Pierrot, chercheuse en cryptographie au Loria (CNRS-université de Lorraine), à Nancy

ERIC VANDEVILLE / AKG IMAGES

Le roi François Ier et l'empereur Charles Quint signent un traité le 18 juin 1538, appelé la paix de Nice, mettant fin à la huitième guerre d'Italie et instaurant une trêve de dix ans entre les deux belligérants, après vingt-cinq années d'affrontements.

ner du sens à ce que l'on voyait, même en ayant quelques certitudes », se rappelle Cécile Pierrot. « *Après quatre mois à tâtonner, nous avons estimé qu'il nous fallait un coup de pouce dans un domaine que nous ne maîtrisions pas et qui pourrait peut-être nous mettre sur de nouvelles pistes.* » Ils contactent alors Camille Desenclos, historienne à l'université de Picardie Jules-Verne et spécialiste des relations entre la France et le Saint Empire. Par un heureux hasard, il se trouve que l'experte mène justement un projet d'étude sur l'essor de la cryptographie dans la France des XVIe et XVIIe siècles. Toutefois, la sollicitation est une première pour elle : « *Je suis régulièrement approchée par des amateurs mais jamais par des chercheurs en cryptographie,* confesse-t-elle. *J'étais donc ravie de me lancer dans cette collaboration inédite.* » Camille Desenclos donne aux cryptographes l'information qui leur manquait : il existe à la bibliothèque municipale de Besançon plusieurs dépêches codées de Charles Quint dont le déchiffrement, c'est-à-dire la « traduction » des symboles cryptographiques en clair, fut établi dans la marge au moment de leur réception par leur destinataire. « *À ce moment-là, on fait un bond de géant* », raconte Cécile Pierrot. Car même si des symboles diffèrent entre les courriers, leur méthode de chiffrement est la même. En quelques jours seulement, les chercheurs parviennent alors à reconstituer l'essentiel du système. « *La méthode de Charles Quint est en réalité assez traditionnelle pour le milieu de XVIe siècle* », affirme Camille Desenclos. Mais cette dernière présente une spécificité méconnue que la dépêche de Nancy est l'occasion d'étudier : les voyelles sont figurées par un simple point autour des consonnes, les faisant disparaître un peu à la manière de l'arabe. « *C'est ce qui a rendu la tâche des cryptographes si compliquée.* »

Les pièces du puzzle finissent par s'assembler

Reste quelques mystères à éclaircir, comme une poignée de symboles isolés. Il y a notamment cette « épingle » *(lire l'encadré p. 86)*, qui apparaît à la fin d'une phrase entièrement chiffrée dans laquelle Charles Quint interroge son ambassadeur sur les intentions du roi de France depuis que celui-ci a appris le trépas de la personne désignée par ledit symbole. Cécile Pierrot a l'intuition qu'il s'agit d'un monarque, puisque l'épingle ressemble beaucoup au symbole désignant un roi dans d'autres lettres de Jean Saint-Mauris. Pourtant, Camille Desenclos est formelle : aucun roi n'est mort en janvier ou février 1546, date qui figure au bas de la lettre. « *Après réflexion, j'ai compris que la date n'était pas celle que l'on croyait, pour la simple raison que dans la première moitié du XVIe siècle dans la chancellerie impériale, les changements d'années s'effectuaient encore à Pâques* », détaille l'historienne. Les pièces du puzzle s'assemblent enfin : la missive a en réalité été écrite le 22 février 1547, soit moins d'un mois après le décès d'Henri VIII

CEDRIC JACQUOT/MAXPPP

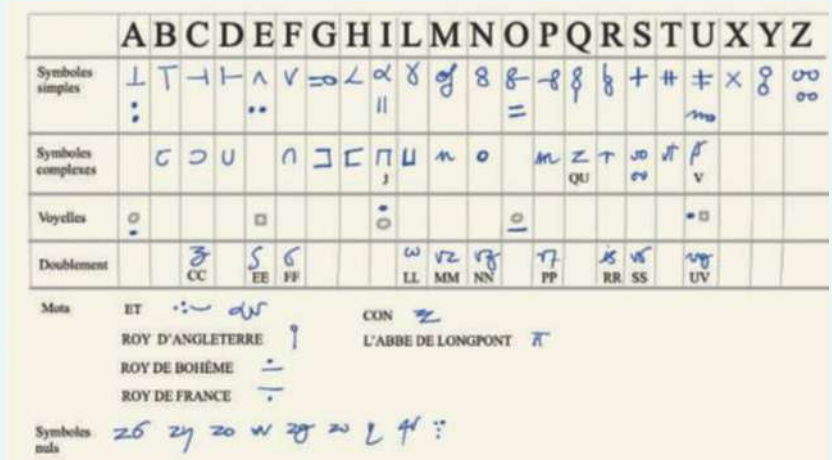
« Nous n'avions aucune lettre de l'empereur à Jean Saint-Mauris sur cette année 1547. La dépêche de Nancy a permis de remplir un creux »

Camille Desenclos, historienne à l'université de Picardie Jules-Verne, spécialiste des relations entre la France et le Saint Empire

MÉTHODE

Une clé de chiffrement à plusieurs niveaux de complexité

Les cryptographes de Charles Quint n'ont pas facilité la tâche de leurs successeurs du XXIe siècle ! Le tableau ci-contre expose de façon claire les trois grandes astuces employées pour brouiller les pistes des ennemis qui auraient intercepté l'échange. La première consiste à chiffrer sous la forme d'un simple point ou trait toute voyelle lorsque celle-ci est précédée d'une consonne. Ainsi, les syllabes formées d'une voyelle et d'une consonne deviennent des symboles complexes agrémentés d'un point ou d'un trait correspondant à la voyelle souhaitée (seule la position du point autour du symbole change). Ce qui nous conduit à la seconde difficulté : on remarque justement qu'aucun point ou trait ne correspond à la lettre E. Tous ont été volontairement supprimés lorsqu'ils sont liés à une consonne ! Un symbole complexe qui ne comprend aucun point ou trait cache donc forcément un E. Troisième difficulté : la présence de symboles nuls, disséminés parfois au beau milieu d'un mot, et qui doivent être ignorés. Pour le reste, la méthode est plus traditionnelle : chaque lettre a son symbole simple (pour les voyelles, lorsqu'elles commencent des mots ou suivent une autre voyelle, et pour les consonnes, lorsqu'elles ne sont pas suivies d'une voyelle), tout comme les lettres doublées (deux M, deux N…) et certains mots entiers, tous référencés ici. Attention, « con » n'est pas un terme grossier : il s'agit d'une abréviation fréquemment utilisée à l'époque.



BIBLIOTHÈQUE STANISLAS DE NANCY/INRIA NANCY

d'Angleterre, survenu le 28 janvier. Mais alors que dit cette lettre ? Beaucoup de choses sur l'état d'esprit de Charles Quint. *« Nous n'avions aucune lettre de l'empereur à Jean Saint-Mauris sur cette année-là et la dépêche de Nancy nous a permis de remplir un creux »*, se réjouit Camille Desenclos. La prose désormais déchiffrée révèle trois préoccupations majeures du monarque en cette période d'accalmie dans les conflits qui opposent depuis près d'un demi-siècle les rois de France aux rois d'Espagne. *« Accalmie toute relative puisque, au début de l'année 1547, la tension est à son comble entre François Ier et Charles Quint. »* Ainsi, les objectifs de l'empereur sont de maintenir la paix avec le roi français pour ne pas éparpiller ses forces, de mettre fin au conflit qui l'oppose à la ligue de Smalkalde *(lire l'encadré p. 84)*, et d'éviter les assassinats… à commencer par le sien. Charles Quint fait en effet état d'une rumeur qui le tracasse au plus haut point : Pierre Strozzi, chef de guerre au service de François Ier dont le nom est brouillé par des symboles nuls, aurait formulé devant son roi l'intention de l'assassiner. Charles Quint cherche ainsi à vérifier auprès de Saint-Mauris l'exactitude de ces informations et, le cas échéant, il explique vouloir savoir comment François 1er a réagi aux paroles de Pierre Strozzi. *« À cette époque se mène aussi en Europe une virulente guerre de l'information — ou plutôt de la désinformation —, qui consiste en la propagation de rumeurs infondées destinées à embrouiller et déstabiliser les puissances ennemies,* détaille Camille Desenclos. *Il est possible que cette histoire d'assassinat soit l'une d'entre elles. »*

Outre les informations précieuses que la lettre a fini par livrer, son décryptage est un exemple inédit de collaboration fructueuse entre cryptographes et historiens. *« Sans l'aide de Camille Desenclos, nous aurions sans doute mis un temps considérable à la déchiffrer »*, avoue Cécile Pierrot, qui reconnaît également avoir pris goût au décryptage de documents historiques, elle qui d'ordinaire planche sur des systèmes de chiffrage bancaires ou biométriques. Cela tombe bien car selon Camille Desenclos, 2 à 5 % des documents historiques chiffrés le restent encore à ce jour. ■

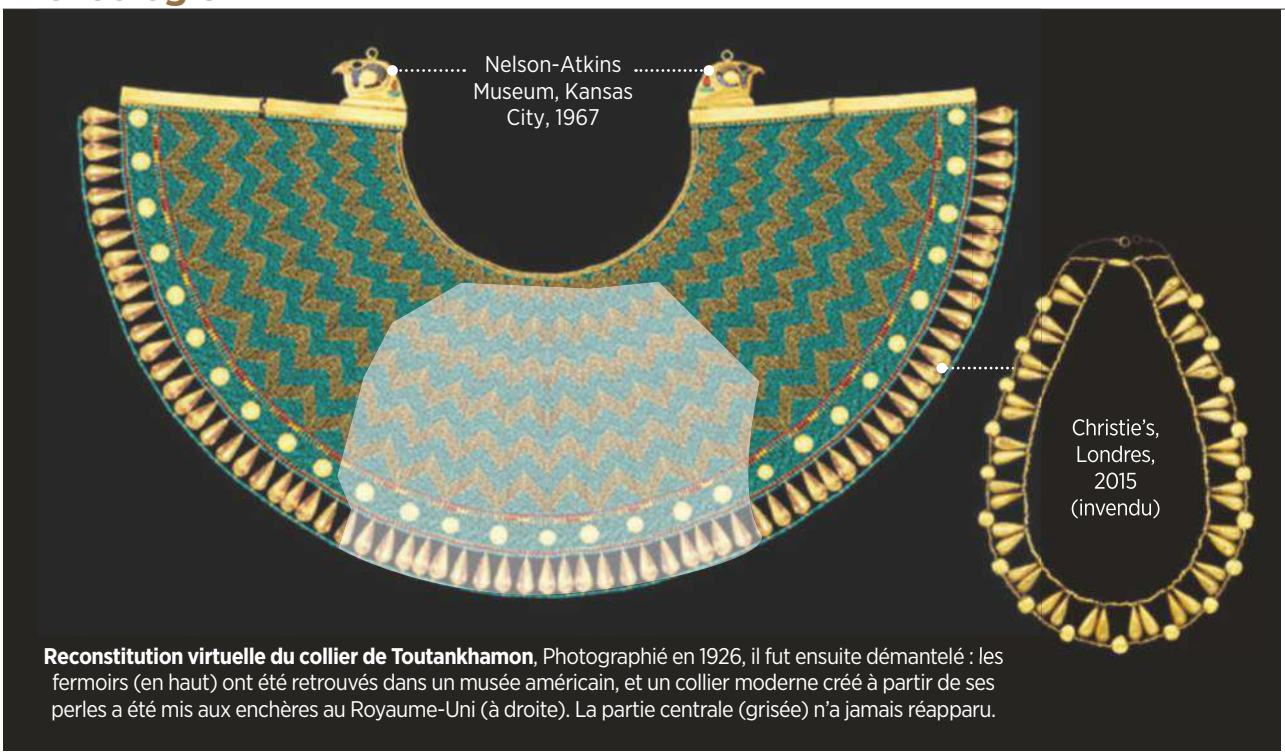
BPK, BERLIN, DIST. RMN-GRAND PALAIS

Les trésors du tombeau sont emballés par Howard Carter (à gauche, en 1923) en vue de leur transport au musée du Caire. L'égyptologue a longtemps été soupçonné d'avoir sorti illégalement des objets du site, rumeur que des éléments récents viennent d'étayer.

Toutankhamon : les petits arrangements d'un grand égyptologue

Howard Carter, le découvreur du tombeau du célèbre pharaon en 1922, n'a pas hésité à prélever certaines pièces ornant la momie pour son usage personnel. Certains objets demeurent, aujourd'hui encore, activement recherchés.

Il y a 100 ans, le 17 février 1923, le Britannique Howard Carter (1874-1939) pénétrait dans la chambre funéraire du tombeau de Toutankhamon. L'histoire a retenu qu'il fit ainsi la plus grande découverte archéologique du siècle. Un événement terni par des rumeurs de « prélèvements » inavouables dans le trésor du pharaon par l'illustre égyptologue. Récemment, à la faveur du centenaire de sa découverte, des accusations plus formelles ont resurgi. C'est le cas avec la publication d'une lettre inédite du savant britannique sir Alan Gardiner datée de 1934, à qui Carter avait remis une amulette, l'assurant qu'elle ne provenait pas du tombeau. Malheureusement, Alan Gardiner apprit en montrant l'objet à son compatriote Rex Engelbach, alors directeur du Musée égyptien du Caire, que la relique venait bien de la



Reconstitution virtuelle du collier de Toutankhamon, Photographié en 1926, il fut ensuite démantelé : les fermoirs (en haut) ont été retrouvés dans un musée américain, et un collier moderne créé à partir de ses perles a été mis aux enchères au Royaume-Uni (à droite). La partie centrale (grisée) n'a jamais réapparu.

R. COHON/COURTESY MARC GABOLDE

tombe du souverain de la XVIIIe dynastie. D'ailleurs, des exemplaires identiques se trouvaient en possession du musée. *« L'amulette que vous m'avez montrée a sans doute été volée dans la tombe de Toutankhamon »*, écrit-il alors à Howard Carter. *« Je regrette profondément d'avoir été placé dans une position si inconfortable »*, avoue-t-il, ajoutant : *« Naturellement, je n'ai pas dit à Rex Engelbach que j'avais obtenu l'amulette de vous… »* Conservée dans une collection privée et restée inédite, cette lettre a été publiée par l'égyptologue américain Bob Brier dans un livre paru à l'automne 2022, *Toutankhamon et le tombeau qui a changé le monde* (éditions Oxford University Press). Mais comment Howard Carter a-t-il commis son forfait ? En réalité, il a toujours été soupçonné d'être entré dans l'antichambre de la tombe avant son ouverture officielle le 26 novembre 1922, et avoir alors emporté quelques objets. Certes, pendant tout une époque, du XIXe siècle au début du XXe siècle, les fouilleurs travaillant en Égypte étaient autorisés à conserver quelques artefacts archéologiques pour les rapporter dans leur pays d'origine, dans le cadre d'un « partage » légal. Mais Howard Carter n'avait pas obtenu cet accord pour le tombeau de Toutankhamon. Ce qui ne l'a pas empêché de passer outre. *« Pour moi, Howard Carter était un homme du XIXe siècle, qui a grandi au sein de l'empire britannique, avec un rapport à l'Égypte datant de l'époque victorienne,* explique Marc Gabolde, égyptologue à l'université Paul-Valéry Montpellier-3. *Jamais il n'a dû se dire ni penser qu'il "pillait". Après des années de travail acharné en Égypte, il ne s'est pas rendu compte que ce pays avait changé et que de tels comportements étaient ceux d'une autre époque. »*

« Après la mort d'Howard Carter, en 1939, c'est sa nièce, Phyllis Walker, qui avait eu à s'occuper de ses biens. Et une maison de vente avait identifié une vingtaine de pièces en sa possession comme ayant appartenu à Toutankhamon », raconte l'égyptologue. Aussi, pour épargner la mémoire de son oncle, une solution diplomatique avait été trouvée. Le Français Étienne Drioton, alors directeur du Service des antiquités égyptiennes, suggéra de faire don des objets suspects au roi Farouk d'Égypte (1920-1965) pour qu'il les transmette au musée du Caire. Ce qui fut fait en 1946. *« Ces trésors ne pouvaient pas être remis directement par la descendante d'Howard Carter au musée, car cela aurait été la preuve qu'ils étaient sortis illégalement de la tombe »*, précise Marc Gabolde. Mais ils ne furent pas les seuls. On sait aujourd'hui que d'autres objets de la collection Carter avaient déjà été dispersés par la maison de vente aux enchères londonienne Spink & Son. De même que tous les documents personnels et de travail d'Howard Carter vendus par la société Bonhams, sans que le monde scientifique n'en ait jamais été alerté. Aujourd'hui, de précieuses

MARC GABOLDE

« Jamais Howard Carter n'a dû se dire ni penser qu'il "pillait" »

Marc Gabolde, égyptologue à l'université Paul-Valéry Montpellier-3

archives non étudiées sont donc dans les mains de collectionneurs privés… Ainsi, depuis 1922, des objets provenant du célèbre tombeau se sont retrouvés sur le marché des antiquités égyptiennes. Et plusieurs même dans des musées, et non des moindres : le Metropolitan Museum of Art de New York (États-Unis), avait en sa possession 19 pièces acquises entre 1920 et 1940, *« attribuées avec certitude à la tombe de Toutankhamon »*. Certaines avaient été récupérées par le photographe Harry Burton (1879-1940) dans la maison égyptienne d'Howard Carter à Gournah, près de Louxor, après sa mort. Toutes ont été restituées à l'Égypte en 2010.

À la recherche des joyaux volatilisés

En revanche, d'autres objets disparus demeurent activement recherchés. Marc Gabolde tente ainsi depuis sept ans de retrouver un collier qui, pendant 3000 ans, était resté sur la poitrine de Toutankhamon. Spécialiste du célèbre pharaon de la XVIII[e] dynastie, l'archéologue s'est en effet rendu compte que la splendide parure, dont on disposait du relevé, s'était évaporée. Or, ce collier était encore partiellement en place sur la momie du pharaon quand celle-ci a été replacée dans son cercueil, le 23 octobre 1926, après son « autopsie », comme le prouve un cliché de Harry Burton. Mais lorsque la dépouille du souverain a été extraite de son sarcophage pour être radiographiée en 1968, les restes du collier pectoral avaient totalement disparu.

L'affaire aurait pu en rester là, si l'œil affûté de Marc Gabolde n'avait pas aperçu un collier en or mis aux enchères dans les pages d'un catalogue de vente de chez Christie's, à Londres, en 2015. *« En le voyant, j'ai eu l'impression d'en reconnaître les composants »*, explique-t-il. Quelques mois d'enquête confirment ses doutes : le collier constitué de perles en or en forme de gouttes de chez Christie's est directement issu du collier pectoral « n° 256 ttt » arboré par Toutankhamon. À partir des éléments antiques, un nouveau collier moderne a été composé puis mis en vente à Londres.

Que s'est-il donc passé ? *« En fait, le collier 256 ttt a été volé en deux fois »*, résume Marc Gabolde. Selon l'égyptologue français, entre 1925 et 1927, Howard Carter a rapporté en Angleterre les fermoirs en or à tête de faucon du collier de Toutankhamon, ainsi que les bordures extérieures. *« Une partie de ces pièces se sont retrouvées au musée Nelson-Atkins à Kansas City, aux États-Unis, en 1967, tandis que d'autres ont fini chez Christie's, à Londres, en 2015 »*, déclare Marc Gabolde. Les fermoirs avaient été achetés en 1967 par le musée américain auprès de la maison de vente Spink & Son et d'un collectionneur. Lequel les avait reçus d'un chirurgien amateur d'égyptologie, lord Moynihan… à qui Howard Carter les avait remis. *« Ensuite, entre 1926 et 1968, ce que Carter avait laissé sur la poitrine de la momie de Toutankhamon (la partie centrale du collier) a été volé. Probablement par des gardiens du tombeau pendant la Seconde Guerre mondiale »*, estime Marc Gabolde. Cette partie du collier n'est jamais réapparue sur le marché. *« Je crains fort que l'or n'ait été fondu »*, soupçonne l'égyptologue. La momie de Toutankhamon portait également sur la tête une coiffe décorée de deux cobras faits de perles qui demeure introuvable. Tous les joyaux découverts dans le tombeau de Toutankhamon ne seront donc pas rassemblés pour l'ouverture du Grand Musée égyptien (GEM). Et l'enquête se poursuit. ■

Bernadette Arnaud @NarudaaArnaud

TRAFIC D'ANTIQUITÉS

La stèle d'Abu Dhabi, nouvel objet de discorde

Aujourd'hui encore, le nom de Toutankhamon est associé à des trafics. Pour preuve, le scandale déclenché en mai 2022 autour d'une stèle en granit rose d'Assouan dite de Toutankhamon, haute de 1,66 mètre et exposée depuis son inauguration en 2017 au Louvre Abu Dhabi. Il s'agit d'un rare décret royal remontant au règne de Toutankhamon (1336-1327 avant J.-C.). Il a été acquis en 2016 avec six autres objets d'art égyptien par le Louvre Abu Dhabi, pour une valeur totale de 50 millions d'euros. Mais ses certificats d'origine seraient faux. Quand la stèle est-elle sortie d'Égypte ? Entre 1933 et 2011, selon les versions… Et comment ? C'est tout le cœur d'une affaire complexe dans laquelle hommes de paille, experts, conservateurs manquant de vigilance et trafiquants d'antiquités passés maîtres dans l'établissement de faux certificats, se sont trouvés mêlés. En mai 2022, l'ancien président du Louvre et l'ex-directeur scientifique de l'agence France-Muséums ont été mis en examen. Le délibéré est attendu pour le 3 février.

ANADOLU AGENCY / AFP

Les certificats d'origine de la stèle du Louvre Abu Dhabi seraient des faux.

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 90

▶ C'est à voir
p. 92

▶ Le ciel du mois
p. 93

▶ Chroniques
p. 94

▶ Questions de lecteurs
p. 96

▶ Solutions des jeux
p. 97

▶ Jeux
p. 98

RAPHAEL KESSLER/HANSLUCAS

L'enseignement de l'histoire des sciences permettrait de mieux déjouer les affirmations trompeuses.

Combattre l'emprise des « fake news »

Un percutant essai du physicien Hubert Krivine démonte les mécanismes de la désinformation et plaide pour un renfort de la culture scientifique.

INSTRUMENTALISATION

« Nous pensons que l'histoire de la chute et du déclin des bobards du passé peut aider une réflexion critique sur ceux du présent. » Dans ce texte à l'actualité brûlante contre les croyances fausses, enrichi d'une préface limpide du professeur en zoologie et systématique Guillaume Lecointre, le physicien Hubert Krivine s'engage dans l'analyse de l'instrumentalisation des interprétations des textes sacrés et l'ingérence des religions qui en découle, et des faux sur le terrain scientifique et sociétal, qui font souvent le lit de manipulations politiques. En définissant les *fake news* comme des affirmations trompeuses, il en décortique l'emprise à travers des cas choisis en fonction de leur toxicité exemplaire : le climatoscepticisme de Claude Allègre, la mémoire de l'eau de Jacques Benveniste, le créationnisme, l'homéopathie — contre laquelle il a une position peu nuancée, au détail près que puisqu'elle produit autant d'effets que l'effet *placebo*, pourquoi pas… ! Ou encore les vertus de l'hydroxychloroquine, le médicament contre le Covid-19 défendu par Didier Raoult, la polémique récente sur les vaccins restant un cas d'école du naufrage de la crédibilité des autorités face à une dérive qui a réduit la science au rang d'une opinion comme une autre. Mais que signifie faire confiance ? Avec quels instruments lutter contre les infox à l'heure où leur propagation se fait à une vitesse fulgurante ? On ne peut se contenter d'énoncer le vrai : nos élites manquent de culture scientifique, et il faut enseigner l'histoire des sciences, qui n'assènent pas de vérités mais avèrent des faits tout le long d'un chemin parsemé d'erreurs. ■

Andreina De Bei

On nous aurait menti ? De la rumeur aux fake news, Hubert Krivine, préface Guillaume Lecointre, De Boeck Supérieur, 158 p., 15,90 €

Pour un cachet d'aspirine…

THÉRAPEUTIQUE Sali Cylic-Acid est une molécule qui mène une vie paisible dans l'écorce d'un saule. Jusqu'au jour où on l'arrache de son arbre à coups de rabot. Débute alors une odyssée qui nous fait découvrir le processus de fabrication de l'aspirine et son mode d'action dans le corps humain. Dans ce livre où se mélangent fiction et réalité scientifiques, Marcel Hibert, grand spécialiste d'innovation thérapeutique, détaille aussi comment sont conçus les nouveaux médicaments, du choix de la pathologie à traiter jusqu'à leur mise sur le marché. Pédagogique et ludique. ■ **V. G.**

Odile a mal au crâne, Marcel Hibert, HumenSciences, 226 p., 19,90 €

Bienfaits de la connaissance

PANORAMA Comment le savoir scientifique se crée-t-il et se transforme-t-il ? Comment se diffuse-t-il depuis des millénaires ? De l'invention de l'écriture à la numérisation, en passant par la révolution scientifique du début de l'ère moderne, Jürgen Renn, directeur de l'Institut Max-Planck d'histoire des sciences (Allemagne), revisite les épisodes clés de l'évolution des sciences et des techniques. Il montre comment la connaissance oriente ou perturbe les sociétés et alerte sur le fait qu'aujourd'hui elle est produite de façon ultrafragmentée. ■ **M. G.**

L'Évolution de la connaissance, Jürgen Renn, Les Belles Lettres, 752 p., 29,50 €

La passion du Groenland

TÉMOIGNAGE Dans les années 1930, l'explorateur Paul-Émile Victor a effectué deux séjours sur la côte orientale du Groenland. Il en a rapporté 40 kg de descriptions, de dessins et de photographies. Ce travail unique a été perdu en 1940 et retrouvé en 1986. L'ethnologue a alors enrichi cette matière avec l'anthropologue Joëlle Robert-Lamblin. Ce document étonnant — réédition du texte de 1989 enrichi d'inédits — nous plonge dans le quotidien d'une société qui, après la disparition des baleines surpêchées, s'est tournée vers la chasse au phoque. ■ **S. R.**

La Civilisation du phoque, Paul-Émile Victor, Joëlle Robert-Lamblin, Belin, 448 p., 35 €

La nature, immense réservoir d'idées

GÉNIE NATUREL La nature est une source inépuisable d'innovations pour les chercheurs, montre ce très beau livre à travers 34 exemples variés et souvent surprenants. Des réalisations bien concrètes en découlent déjà. La structure des termitières cathédrales a ainsi inspiré des architectes pour un immeuble à température autorégulée en Afrique. L'ouvrage, condensé de la série de films à succès *Nature = Futur !*, explique les inventions naturelles et comment de nombreux laboratoires, notamment français, ont su les exploiter. ■ **P. K.**

Biomimétisme. Il y a du génie dans la nature !, Jean-Philippe Camborde, Quae, 160 p., 26 €

L'espoir fait vivre

OPTIMISME Attention, oxymore. Le mot « hasard » du titre du livre se décline en hasardeux, ce qui invite l'humain à se méfier du danger qui rôde. Destin, fatalité. Or voilà ce hasard… « enchanté » ! De quoi se rassurer. Comme rassure le sous-titre et son mot « espoir », priorité de Patrick Clervoy. « *La vie est un combat qui se nourrit des forces de l'espoir* », insiste le médecin psychiatre qui dit avoir la « *foi athée* » et multiplie ici les témoignages de patients dont il lui a fallu apaiser les angoisses face au tragique de l'existence. « *Vivre, c'est chercher la beauté, s'émerveiller et remercier l'Univers* », écrit l'adepte du *Carpe diem*. Le lecteur pourra lire les 21 chapitres aux 161 intertitres de façon linéaire ou en picorant à volonté, de la suite de Fibonacci et l'ordre mathématique du monde au mythe de Faust revisité, en passant par malédictions, superstitions et… « Le bonheur d'être conscient ». Un optimisme nécessaire qui devrait rasséréner ceux qui croient au hasard et ceux qui n'y croient pas. ■ **Dominique Leglu**

Le Hasard enchanté et les forces de l'espoir, Patrick Clervoy, Odile Jacob, 256 p., 21,90 €

Vertige de la création

ITINÉRAIRES « *Quand l'homme voulut pour son utilité donner du mouvement aux choses inertes, il n'imita point les jambes, mais créa la roue* », *dixit* Apollinaire, qui côtoie Aristote ou Röntgen dans *Eurêka !*, un livre d'érudition joyeuse où il est question de la roue, du zéro ou de la radioactivité… Soit 36 histoires d'inventions ou de découvertes, enrichies des commentaires de 80 spécialistes pour cette adaptation livresque de l'émission éponyme et estivale de France Culture. **O. L.**

Eurêka!, Natacha Triou et Antoine Beauchamp avec Sophie Garcin, illustrations de Frédéric Bélonie, Alisio sciences, 256 p., 21 €

La technologie, ennemi du travail ?

IMPACT De l'imprimerie à DeepMind, en passant par les métiers à tisser, la technologie a souvent été source de craintes pour l'emploi. L'auteur retrace les grandes lignes de cette histoire pour montrer que le lien entre innovation et disparition des emplois n'est pas si évident. Mais l'impact de l'une sur les autres n'est pas positif pour autant. C'est la manière dont le travail se transforme qu'il faut regarder. Et l'on apprend que les cadres qualifiés sont peut-être les plus menacés par l'IA… ■ **A. D.**

Un monde sans travail, Daniel Susskind, Flammarion, 340 p., 21,90 €

EXPOSITIONS

Bordeaux (33)

Mange-moi, si tu peux !
L'alimentation des animaux est explorée non pas en fonction du régime (herbivore, carnivore, omnivore) mais selon que les produits sont liquides, solides, inertes, mobiles, grands, petits, en vertu d'un découpage de 1928 du zoologue Charles Maurice Yonge.
Muséum, 5 place Bardineau, jusqu'au 31 décembre 2025. Rens. : 05.24.57.65.30.

Le Bourget (93)

Up to space
Coproduite par le musée Universum de Brême (Allemagne) et la fondation La Caixa de Barcelone (Espagne), cette exposition est une vaste expérience plaçant le visiteur dans la peau d'un astronaute avec force mises en situation et dispositifs interactifs.
Musée de l'Air et de l'Espace, 3, esplanade de l'Air et de l'Espace, jusqu'au 20 août. Rens. : 01.49.92.70.00.

Lyon (69)

Nous, les fleuves
Ce parcours imite le cours d'un fleuve, de la source au delta. Il sert à évoquer les différentes relations que tissent les sociétés humaines avec les fleuves, que ce soit sous l'angle de la biodiversité, des arts ou encore de la géopolitique.
Lire notre reportage : sciav.fr/912fleuves
Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 27 août. Rens. : 04.28.28.12.12.

Marseille (13)

Alexandrie : futurs antérieurs
Cette invitation à (re)découvrir la cité égyptienne privilégie deux perspectives, l'archéologie et l'art contemporain, et délaisse les mythes. Il y est question de son rayonnement culturel et scientifique, son urbanisme et sa vie politique, avec quelque 200 œuvres à l'appui.
Mucem, J4, 7, promenade Robert-Laffont, jusqu'au 8 mai. Rens. : 04.84.35.13.13.

Paris (75)

Sur les routes de Samarcande
Exposées pour la première fois hors d'Ouzbékistan, 300 pièces témoignent d'un savoir-faire unique : manteaux somptueux (les chapans), selles en bois peintes, accessoires brodés d'or, costumes de nomades, tapis, bijoux…
Institut du monde arabe, 1, rue des Fossés-Saint-Bernard, jusqu'au 4 juin. Rens. : 01.40.51.38.38.

Prémanon (39)

L'ours dans la biodiversité polaire
Prolongée jusqu'en décembre, cette exposition se consacre à l'ours polaire et à son milieu. Un voyage parmi les icebergs et sur la banquise, mais aussi l'occasion de replacer l'animal dans son environnement de faune et de flore.
Espace des mondes polaires, 146, rue Croix-de-la-Teppe, jusqu'au 5 décembre. Rens. : 03.39.50.80.20.

Toulouse (31)

Pierre-Georges Latécoère, l'avenir a des ailes
Pionnier de l'aviation commerciale, créateur de lignes aériennes reliant pays et continents, Pierre-Georges Latécoère (1883-1943) se voit consacrer une exposition à l'endroit où a été construit et a décollé le premier avion toulousain.
L'Envol des pionniers, 6, rue Jacqueline-Auriol. Jusqu'au 31 décembre 2024. Rens. : 05.67.22.23.24.

Paris (75) / Exposition

Arts et préhistoire

C'est un visage mi-humain mi-animal qui ouvre l'exposition. Gravé sur une plaquette calcaire de la Marche (Vienne), il est daté d'il y a 17 000 ans. Autrement dit, bien avant les représentations de la déesse Sekhmet à corps d'humaine et tête de lionne en Égypte. L'exposition présente ainsi, dans sa première partie, près d'une centaine de pièces remarquables d'art mobilier, ces objets sculptés, gravés ou peints, souvent de petite taille, qui accompagnaient nos ancêtres dans leur vie quotidienne. Les représentations féminines, parfois très stylisées, provoquent toujours la même fascination. La célèbre Vénus de Lespugue est entourée d'une dizaine d'autres icônes féminines, réunies pour la première fois, et regroupées par culture. La seconde partie de l'exposition propose une immersion dans l'art pariétal et rupestre du monde entier, par le biais de l'image : films, photos, installations audiovisuelles, projections lumineuses, dispositifs interactifs. L'effet est à la fois vertigineux et intime, spectaculaire et feutré. ■

Rachel Mulot

Lire notre reportage : sciav.fr/912prehistoire
Musée de l'Homme, 17, place du Trocadéro, jusqu'au 22 mai. Rens. : 01.44.05.72.72.

MNHN - J.-C. DOMENECH

La Vénus de Lespugue (datée de -25 000 ans environ).

DÉBAT

Paris (75)

Scientifiques, journalistes, politiques : le bon, la brute, le truand ?
Cette série d'échanges sur les rapports entre médias, sciences et politique est organisée par l'Association des journalistes scientifiques de la presse d'information. Le 30 janvier, un débat sera animé par Philippe Pajot, rédacteur en chef de *La Recherche*, autour du documentaire *La Bataille du climat* (2022), d'Elena Sender, collaboratrice à *Sciences et Avenir*.
Bibliothèque nationale de France, site François-Mitterrand, 154, avenue de France, le 31 janvier. Rens. : sciav.fr/912debat

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

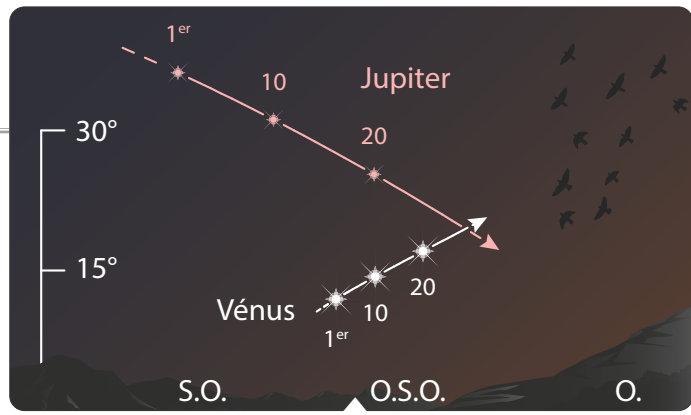
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE
En première quinzaine, la petite planète est encore à plus de 20° à l'ouest du Soleil. Malheureusement, l'écliptique est peu incliné sur l'horizon le matin en cette saison sous nos latitudes. Aussi Mercure ne monte-t-elle pas bien haut au-dessus de l'horizon avant de disparaître dans les lueurs du jour naissant.

VÉNUS
Profitant du relèvement de l'écliptique au fil des jours et d'un éloignement angulaire toujours croissant au Soleil, Vénus devient immanquable en soirée vers le couchant. Elle passera sous l'horizon plus de 2 h 40 après notre étoile en fin de mois.

MARS
La planète Rouge se trouve encore dans de bonnes conditions d'observation. Très haute dans le ciel de début de soirée, elle se couche vers 4 h du matin. Sa distance à la Terre passant de 132 à 170 millions de kilomètres entre le 1er et le 28, elle perd près de la moitié de son éclat dans la même période.



Il est 45 minutes après le coucher du Soleil. Les positions de Jupiter et de Vénus sont données le 1er, 10 et 20 février. La couleur rosée de Jupiter a pour but de faciliter la compréhension de la scène.

Le retour en fanfare de l'étoile du Berger

C'EST VRAIMENT EN FÉVRIER que Vénus fait son retour dans le ciel du soir. On la trouve désormais à une hauteur non négligeable vers le couchant lorsque l'azur s'assombrit. Un peu plus haut, Jupiter ! Les deux planètes les plus brillantes du moment cheminent lentement l'une vers l'autre et seront au plus près le 2 mars, avant de voir leur route diverger.

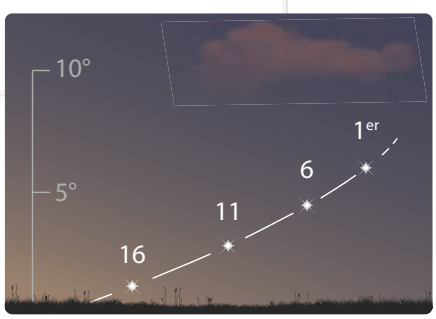
Notre conseil
Vénus et Jupiter sont très facilement observables, même au cœur des grandes villes. Leur rapprochement est donc un phénomène astronomique dont tout le monde pourra profiter.

JUPITER
La plus grosse des planètes est visible dès la tombée de la nuit vers le sud-ouest à une trentaine de degrés de hauteur et se couche de plus en plus tôt. Son rapprochement avec Vénus en fin de mois est de toute beauté.

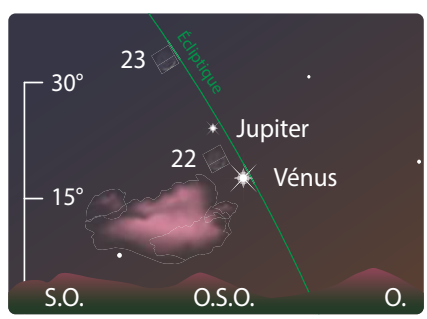
SATURNE
La planète aux anneaux passe en conjonction avec le Soleil le 16. Elle n'est pas observable en février.

L'appli du mois

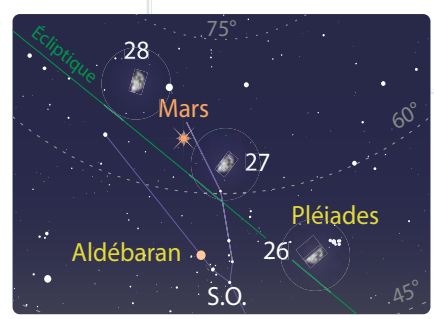
NASA est une application gratuite en anglais pour Android et iOS. Elle donne de très nombreuses informations sur les activités de l'agence spatiale américaine et propose une énorme banque de données et d'images sur l'Univers.



LE MATIN, DURANT LES PREMIERS JOURS DU MOIS, Mercure est observable vers le levant, à la condition impérative d'avoir un horizon sud-est totalement dénué d'obstacle.



LE SOIR DU 22, 45 MINUTES APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, Jupiter et Vénus encadreront un très fin croissant de Lune accompagné de sa lumière cendrée. À vos appareils photo !



LE SOIR DU 26, 2 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, la Lune en quartier sera à 2° du bel amas d'étoiles des Pléiades et le lendemain, au même moment, à moins de 5° de Mars.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de février

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CÉLINE GUIVARCH ET CHRISTOPHE CASSOU

Vers une meilleure santé en sauvegardant le climat

Les vagues de chaleur mettent nos corps à l'épreuve : maux de tête, nausées, déshydratation… jusqu'aux coups de chaleur parfois mortels. 10 000 décès en excès ont ainsi été estimés en France pour l'été 2022 marqué par une succession de canicules. En augmentant la fréquence et l'intensité des événements extrêmes, le changement climatique se fait meurtrier. Les enjeux d'adaptation sont considérables : préparation des systèmes de santé, évolution des pratiques professionnelles pour les métiers les plus exposés, etc. Mais le changement climatique a des répercussions sur notre santé de bien d'autres façons : perturbation des systèmes alimentaires, difficultés d'accès à une eau potable, augmentation des maladies à transmission hydrique ou vectorielle et santé mentale affectée (traumatisme après incendies, etc.). Et si, en réduisant nos émissions de gaz à effet de serre, nous protégions doublement notre santé grâce à des impacts du changement climatique réduits mais aussi grâce aux bénéfices sanitaires directs des modes de vie bas-carbone dont nous profiterions ! S'affranchir des énergies fossiles, en plus de réduire les émissions de gaz à effet de serre, diminue les polluants locaux néfastes pour la santé. Développer les mobilités actives, marche et vélo, lutte contre la sédentarité. Adopter des régimes alimentaires moins carnés, suivant les recommandations nutritionnelles, évite des émissions de méthane et contribue à prévenir l'obésité, le diabète de type 2, les maladies cardio-vasculaires et certains cancers. Nous y gagnerions un air plus respirable, une eau plus pure, des écosystèmes préservés et du bien-être. Santé planétaire et santé des vivants ne font qu'un. ■

Directrice de l'institut Henri-Poincaré, à Paris.

CAMILLE CIER / HANS LUCAS

MATHS PAR SYLVIE BENZONI

Une affaire de dimension

Dans la vie courante, les dimensions d'un objet sont des nombres mesurant sa taille. Par exemple, la hauteur, la largeur et la profondeur d'un placard. Mathématiquement, la dimension du placard est égale à trois. Il est tridimensionnel (3D) comme tous les objets qui nous entourent, même si certains sont tellement fins qu'ils peuvent être vus comme bidimensionnels. C'est le cas des toiles, sur lesquelles les peintres ont développé depuis longtemps des techniques de perspective pour représenter en 2D des objets 3D. L'étude des espaces de dimension supérieure (4D et au-delà) est plus récente. La difficulté à les représenter suscite souvent un blocage. Y compris chez des personnes manipulant des espaces de grande dimension sans s'en rendre compte, notamment si elles travaillent sur des tableaux de données. Des données biomédicales d'une population : âge, poids, taille, rythme cardiaque, tension et glycémie fournissent déjà six dimensions. Les masses de données collectées par les géants du Web sont en dimension bien plus grande. Quand la dimension augmente, une boule occupe une portion de plus en plus petite de toute boîte qui la contient : 50 % en 3D, 8 % en 6D, 1‰ en 11D… En sciences des données, on doit composer avec le « fléau de la dimension », lié au fait que les données sont concentrées dans une petite portion de l'espace. C'est un sujet au carrefour de la statistique, de la géométrie et de la topologie. ■

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Infox, intelligence artificielle et éducation aux médias

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

La désinformation existe depuis très longtemps (*lire notre chronique éthique dans* S. et A. *n° 901*). Ceux qui la condamnent incriminent tantôt la volonté de nuire des émetteurs, tantôt l'appétence pour le sensationnel, la vulnérabilité et la crédulité des récepteurs, tantôt encore la cupidité de certains médias peu scrupuleux qui cherchent à accroître leur audience en diffusant des balivernes plaisantes. Rien de neuf ici ! Pourtant, aujourd'hui, les infox prolifèrent, et ce dans des proportions inégalées, et l'intelligence artificielle y prend une part majeure. Pour le comprendre, rappelons que dans le passé, pour assurer leur rentabilité, les médias de masse forgeaient des messages à sensation susceptibles de plaire aux plus larges audiences. Avec les réseaux sociaux, il en va différemment : des utilisateurs émettent ou relaient des informations qui devront trouver d'elles-mêmes ceux qui les « goberont » et les propageront. Les médias jouent alors le rôle de facilitateur en aiguillant au mieux les messages. À cette fin, ils déterminent, pour chaque nouvelle, son statut, en particulier sa signification et sa tonalité affective ; ils identifient ensuite les segments du public les plus susceptibles de l'accueillir et d'y réagir ; enfin, ils la leur transmettent. Ces opérations recourent à l'intelligence artificielle pour catégoriser les messages, profiler les utilisateurs, puis pour apparier profils et messages afin de cibler les publics sensibles à tel ou tel propos. Tout dernièrement, et c'est la grande nouveauté, l'intelligence artificielle intervient aussi dans la production : avec les « réseaux antagonistes génératifs » d'un côté et les gros modèles de langages comme GPT de l'autre, textes, sons et images sont générés à volonté, de façon à faire illusion et à tromper, ce qui accroît encore, et dans des proportions démesurées, le nombre potentiel de fausses nouvelles. Dans ce contexte d'inflation d'infox, seule parade : éduquer aux médias dès le plus jeune âge, insuffler l'esprit critique et apprendre à confronter les sources. ■

BRUNO LEVY

L'ŒIL DE LASCAR

L'expression « planète océan » évoque irrésistiblement un astre recouvert d'une étendue d'eau liquide. L'idée est trompeuse. Car sur un tel astre, H_2O peut exister sous la forme d'une gigantesque couche de vapeur d'eau… Une planète cocotte-minute ! Ce portrait robot correspond à deux exoplanètes découvertes dans le système Kepler-138, à 218 années-lumière de la Terre, dans la constellation de la Lyre. Pour les dénicher, Caroline Piaulet, de l'institut Trottier de recherche sur les exoplanètes de l'université de Montréal (Canada) a dû croiser les données de trois télescopes : Kepler, Hubble et Spitzer. **O. L.**

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

GÉOLOGIE

D'où vient le pétrole ?

David C.

Le pétrole est issu de la décomposition de quantités colossales de plancton. À leur mort, ces organismes tombent au fond des océans et forment une couche sédimentaire qui s'enfonce lentement. Au-delà de 1000 mètres, elle forme une roche-mère qui, vers 2000 mètres et à 100 °C environ, commence à générer du pétrole brut. Ce dernier s'échappe ensuite et entreprend un lent mouvement vers le haut. Il peut alors rencontrer une couche rocheuse imperméable sous laquelle il s'accumule pour former un réservoir souterrain. Le processus entier nécessite plusieurs dizaines de millions d'années. ■

Lise Loumé @Lise_Loume

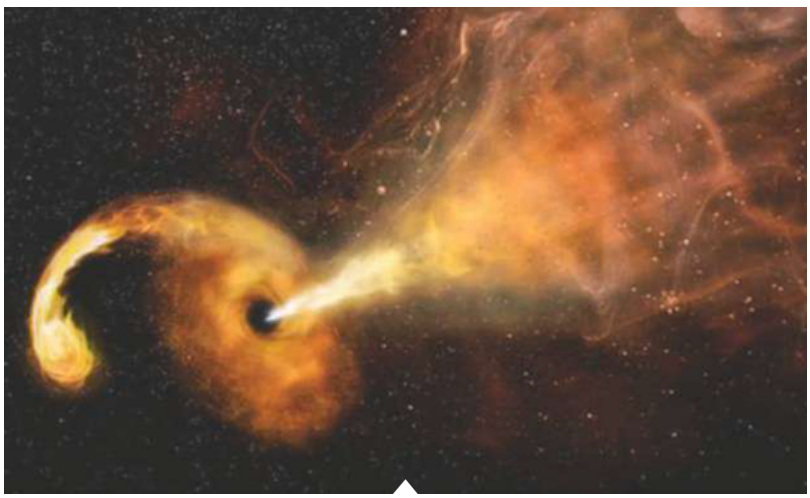
GÉOPHYSIQUE

Comment sortir des sables mouvants ?

Virginie V. D.

On en trouve dans les marais, les bords de plage ou d'anciens cours d'eau. Constitués de sable, d'eau et d'argile, les sables mouvants forment un fluide « non newtonien », car ils changent de consistance selon qu'ils sont frappés, touillés ou laissés tranquilles. Plus on remue un sable mouvant, plus la structure de l'argile se casse, l'ensemble devient alors plus liquide et l'on s'enfonce. Le sable tombe et s'épaissit au niveau des pieds tandis que l'eau remonte en surface. Pour sortir de ce piège, il faut faire des mouvements circulaires avec les jambes pour permettre à l'eau de couler et fluidifier le sable. Le corps humain n'est heureusement pas assez dense pour être englouti : il finit par flotter. ■

Camille Gaubert @CamilleGaubertb



NSF/AUI/NRAO/NASA/SPL/SUCRE SALÉ

Absorption d'une étoile par un trou noir supermassif (vue d'artiste).

ASTROPHYSIQUE

Comment classe-t-on les trous noirs ?

Gérard C.

Les astrophysiciens classent les trous noirs en trois catégories, selon leur taille mais surtout leur masse. Les plus courants sont les trous noirs stellaires, qui ont une masse de quelques soleils — le Soleil pesant 10^{30} kg — et un diamètre de quelques kilomètres. Ils sont issus de l'effondrement gravitationnel du cœur des étoiles massives en fin de vie, qui explosent sous la forme d'une supernova. Ensuite, on distingue les trous noirs de masse intermédiaire, qui auraient une masse comprise en 100 et un million de masses solaires. Ce sont des objets censés être le reliquat de l'explosion d'étoiles géantes qui se sont allumées 400 millions d'années après le Big Bang. Il n'existe pas de preuves formelles de leur existence, mais début 2022, une équipe internationale a publié des résultats suggérant fortement qu'il pourrait s'en cacher un au cœur de B023-G078, le noyau dépouillé d'une petite galaxie. Enfin, les trous noirs supermassifs sont, eux, bien identifiés. D'une masse supérieure à un million de fois celle du Soleil, ils sont hébergés au centre des plus grosses galaxies de l'Univers, comme Sagittarius A*, le trou noir central de notre galaxie, d'une masse de 4 millions de soleils. L'origine de ces monstres cosmiques n'est toujours pas expliquée. Leurs dimensions sont impressionnantes : certains peuvent atteindre des milliards de masses solaires. Comme le plus gros trou noir connu, TON 618, situé à 10 milliards d'années-lumière de la Terre, avec 66 milliards de masses solaires et une taille d'environ 100 fois la distance Soleil-Pluton ! ■

Joël Ignasse @IgnasseJ

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 911, janvier 2022

Logique de lettres

O : toutes les lettres comprenant au moins une surface fermée.

Addition percée

1357 + 6439 = 7796

Magie séquentielle

25	11	9	19	18	82
22	7	24	12	16	81
10	17	27	23	13	90
21	20	15	6	26	88
8	28	5	29	14	84
86	83	80	89	87	79

Panagramme

1 : MS
2 : GRISETTE
3 : GISE
4 : MORGON
5 : RI
6 : NTM
7 : NO
8 : GRIME
9 : MONTS
10 : MRG (émerger)
11 : SONT
12 : RIN (Rintintin)
13 : METTES
14 : GITES
15 : OR
16 : MIGNON
17 : MISER
18 : SIGNORET

M	T	S	E	O	G	I	R	N
S	E	G	I	N	O	R	M	T
T	S	E	G	R	I	O	N	M
E	G	I	O	M	R	N	T	S
R	N	M	T	G	S	E	I	O
I	O	R	N	S	M	T	E	G
O	R	N	M	E	T	S	G	I
G	I	O	R	T	N	M	S	E
N	M	T	S	I	E	G	O	R

Poésie illogique

LA BÊTISE EST SOUVENT L'ORNEMENT DE LA BEAUTÉ ; C'EST ELLE QUI DONNE AUX YEUX CETTE LIMPIDITÉ MORNE DES ÉTANGS NOIRÂTRES, ET CE CALME HUILEUX DES MERS TROPICALES.

(Charles Baudelaire)

(Les quatre premiers mots sont dans l'ordre, les quatre suivants sont inversés, les quatre suivants sont dans l'ordre…)

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 903
Les arbres, gardiens de la Terre

N° 904 Les aliments qui augmentent l'espérance de vie

N° 905/906
Pourquoi ?
Dossier spécial

N° 907
Messages de l'univers lointain

N° 908 7 traitements qui révolutionnent la médecine

N° 909
L'avant Big Bang

N° 910
La science lit dans les pensées

N° 911
Les origines de la vie

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 903 ❑ N° 904 ❑ N° 905/906 ❑ N° 907
❑ N° 908 ❑ N° 909 ❑ N° 910 ❑ N° 911

Nom : . . . . . .
Adresse : . . . . . .
. . . . . Ville : . . . . . .
Code postal : . . . . . .

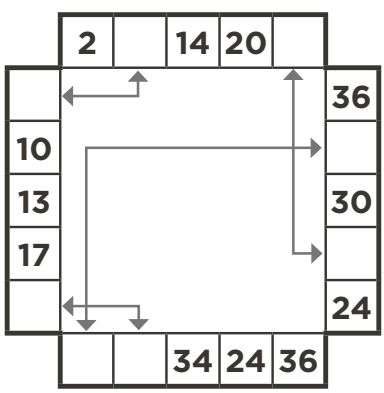
PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

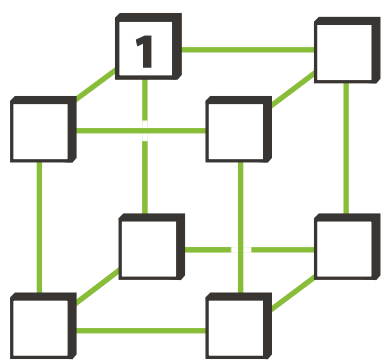
Logique fléchée

Complétez ce carré, sachant que les flèches joignent des cases identiques et que chaque ligne est une suite logique.



Sudocubique

Complétez ce cube avec les nombres de 2 à 8 de telle sorte que deux nombres qui se suivent, par exemple 3 et 4, ne se touchent pas par une arête du cube. Trouverez-vous une des solutions ?



Des moutons et des hommes

Dans une bergerie, il y a des hommes et des moutons.

En regardant bien, on compte à un certain moment qu'il y a au total, tous hommes et moutons confondus, 12 têtes et 44 pieds. Combien y a-t-il d'hommes et de moutons ?

Logique autoréférente

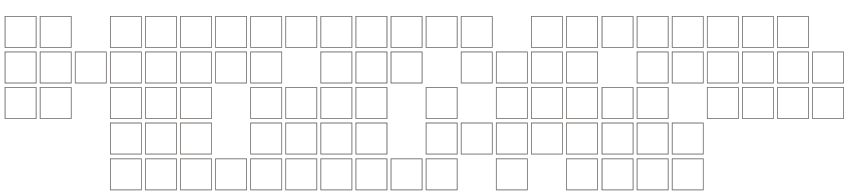
Les valeurs (gros chiffres) des deux colonnes de gauche (roses) indiquent le nombre d'occurrences de chaque chiffre (de 0 à 9) présent dans l'ensemble de la grille. Le coin en haut à gauche de ces 10 cases indique de quel chiffre il s'agit. Complétez la grille de façon cohérente.

1 **3**	6 **2**	2	6	
2	7	1	1	7
3 **4**	8 **1**	3	2	9
4 **3**	9	4	8	
5	0 **2**	9	7	0

La Rochefoucauld au goutte-à-goutte

Laissez tomber chaque lettre verticalement dans une case pour écrire une citation de La Rochefoucauld.

A	A	S	D	E	E	L	M	A	D	E	H	A	E	A	E	E	I	L	A	M	A	E	S	
E	I		E	E	I	N	M	A	H	E	N	I	M	E	S	E	I	O	E	P	H	E	S	
L	T		L	H	I	O	M	S	O	P	S	P	R	D	T	N	L	P	M	S	S	I		
			P	M	S		O	P	U	X		T		V	U	R	N	R	S					
			T	R	S		T		U	X						X		T						



Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

A vos côtés, pour votre santé !

Depuis 1992, nous vous offrons le meilleur des plantes, vitamines et minéraux, pour une santé chaque jour renforcée !

OFFRE DÉCOUVERTE dès **5€**

LABORATOIRES ILAPHARM

www.ilapharm.com

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

Jambes légères
VIGNE ROUGE BIO

Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables**.

6€ 45 gélules

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO

Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(3).*

5€ 45 gélules

Brûle-graisse
GUARANA BIO

Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids**. *(1), (2), (5).*

6€ 45 gélules

Libido
MACA BIO

Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel**.

6€ 45 comprimés

Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C

Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

6€ 45 gélules

Ballonnement
CHARBON & FENOUIL BIO

Soulage rapidement en cas de **ballonnement** et **flatulences**. *(1), (10).*

6€ 45 gélules

Prostate
HUILE DE COURGE BIO

Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie**. Pour un **bon confort urinaire**.

5€ 45 capsules

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6

Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux**. *(6), (8).*

Allergène : ***poisson***.

5€ 45 gélules

Cholestérol
AIL NOIR BIO

Il aide au maintien d'un **taux normal de cholestérol** et possède un **effet cardioprotecteur**. *(7).*

6€ 30 gélules

Vigueur sexuelle
SAFRAN BIO

Le Safran Bio aide à **améliorer l'érection** et **stimule le désir sexuel**. *(2), (4).*

6€ 20 gélules

Vitalité - Immunité
GINSENG SIBÉRIEN BIO

Stimulant et **énergisant**, il aide au bon fonctionnement du **système immunitaire**.

6€ 45 gélules

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO

L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie**.

6€ 10 ampoules ~~15,10€~~ *(2), (9).*

Capacité sexuelle
TRIBULUS

Il favorise le **désir**, la **capacité** et les **performances sexuelles** et participe à la bonne santé des organes reproducteurs. *(2), (11).*

6€ 45 gélules

Un esprit vif
GINKGO BILOBA BIO

Arbre de jouvence, il favorise votre circulation cérébrale pour **un esprit vif et alerte**. *(2), (4), (7).*

5€ 45 gélules

Articulations
FRÊNE BIO

Pour le bon fonctionnement des articulations. **Gardez le plaisir de bouger !**

5€ 45 gélules

Bonne vision
SPIRULINE BIO

Préservez votre vision grâce à la **Vitamine A** issue du **Bêta-carotène** de la Spiruline. *(1), (9).*

6€ 45 comprimés

Vos 3 Cadeaux

LA MONTRE

Homme ou Femme au choix

une montre au choix **OFFERTE**

Modèle Homme : *2 aiguilles fluorescentes, taille du boîtier : 4 cm, longueur : 24 cm, mouvement à quartz.*
Modèle Femme : *taille du boîtier : 2,8 cm, longueur : 23 cm, mouvement à quartz.*

Les Frais de Port Dès 15€ d'achat **OFFERTS** **0€**

dès **5€** **Tous vos produits**

Harpagophytum BIO	5,00€
Spiruline BIO	6,00€
Huile de Courge BIO	5,00€
Safran BIO	6,00€
Maca BIO	6,00€
LA MONTRE Homme ou Femme	**OFFERTE**
Frais de port	**OFFERTS**
TOTAL	**28,00€**

(1) Déconseillé aux enfants de moins de 12 ans. (2) Déconseillé aux femmes enceintes ou allaitantes. (3) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (4) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (5) Contient de la caféine (50 mg par jour). (6) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (7) Ne pas associer avec des anticoagulants. (8) Possible effet laxatif. (9) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (10) Espacez la prise de vos médicaments d'au moins 2 heures. (11) Déconseillé chez les enfants et adolescents, ou en cas de traitement antihypertenseur ou antidiabétique. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

OFFRE DÉCOUVERTE SANS ENGAGEMENT - BON DE COMMANDE

Vos coordonnées ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

Votre date d'anniversaire : |_|_| |_|_| 19|_|_|

E-mail* : .....

pour recevoir les **Offres promotionnelles par mail d'ILAPHARM** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

Recommandé pour la livraison.* de **ses partenaires ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**

N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Date d'expiration : |_|_| |_|_|

Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		6€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		6€	
Charbon & Fenouil BIO	PCFB45		6€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		5€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
Ail Noir BIO	PANB30		6€	
Safran BIO	PSFB20		6€	
Ginseng Sibérien BIO	PGSB45		6€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB		6€	
Tribulus	PTR45		6€	
Ginkgo Biloba BIO	PGBB45		5€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Spiruline BIO	PSNB45		6€	
☐ Je reçois **gratuitement** ma Montre ☐ Homme ou ☐ Femme et mon Catalogue				OFFERTS
☐ Ma commande atteint 15€, **j'économise 5,80€ sur les frais de port**				OFFERTS
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 5,80€**				
CODE PRIVILÈGE : **CS437**			**TOTAL À RÉGLER**	.....€

NOS GARANTIES :

PAYEZ DANS 1 MOIS

*Envoyez votre **règlement par chèque, avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité Fevad · synadiet · Traitement Rapide 24h COLIECO

POUR COMMANDER :

Par internet :
www.ilapharm.com

Par téléphone :
01 49 09 11 11
Du lundi au vendredi : 9h -13h et 14h -18h

Par courrier :
Laboratoires ILAPHARM
C/O BSL - BP 60475
35171 BRUZ CEDEX

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 5,80€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 24h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - relationconso@fevad.com). ADEME : FR202486_01JWKA Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires Ilapharm, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

Jusqu'où peut-on aller

lorsque l'on est bien accompagné ?

Organiser votre patrimoine, préparer une transmission, investir sur les marchés. Vos aspirations n'appartiennent qu'à vous. Nos conseillers et nos experts vous accompagnent pour définir une stratégie financière qui corresponde à vos objectifs et surtout, qui vous corresponde.

Prenez rendez-vous avec un conseiller sur hsbc.fr

HSBC

HSBC Continental Europe – Société anonyme au capital de 1 062 332 775 euros – SIREN 775 670 284 RCS Paris. Siège social : 38 avenue Kléber 75116 Paris. Banque et intermédiaire en assurance immatriculé auprès de l'ORIAS (Organisme pour le Registre des Intermédiaires en Assurance – orias.fr) sous le n° 07 005 894. Crédit photo : Getty Images.